

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Výzkum přesnosti výroby tenkostěnných součástí
pomocí technologie SLM**

Research of the Accuracy of Production of High and Thin-
walled Parts Using SLM Technology

Diplomová práce

Student:

Bc. Zdeněk Mach

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Zdeněk Mach

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Výzkum přesnosti výroby tenkostěnných součástí pomocí technologie SLM

Research of the Accuracy of Production of High and Thin-walled Parts Using SLM Technology

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Rešeršní část technologie SLM a problematiky přesnosti výroby.
3. Návrh experimentu a cíl práce.
4. Diskuze výsledků.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


ZHANG, L.; ZHANG, S.; ZHU, H.; HU, Z.; WANG, G.; ZENG, X. *Horizontal dimensional accuracy prediction of selective laser melting*, Materials & Design, Volume 160, 2018, Pages 9-20, ISSN 0264-1275
HU, Z.; ZHU, H.; ZHANG, Ch.; ZHANG, H.; QI, T.; ZENG, X. *Contact angle evolution during selective laser melting*, Materials & Design, Volume 139, 2018, Pages 304-313, ISSN 0264-1275
ZHANG, L.; ZHU, H.; ZHANG, S.; WANG, G.; ZENG, X. *Fabricating high dimensional accuracy LPBFed Ti6Al4V part by using bi-parameter method*, Optics & Laser Technology, Volume 117, 2019, Pages 79-86, ISSN 0030-3992
YANG, H.; YANG, J.; HUANG, W.; WANG, Z.; ZENG, X. *The printability, microstructure, crystallographic features and microhardness of selective laser melted Inconel 718 thin wall*, Materials & Design, Volume 156, 2018, Pages 407-418, ISSN 0264-1275

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 8.5.2020



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomové práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložena vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 8.5.2020

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Zdeněk Mach

Adresa trvalého pobytu autora práce: Na Hermaně 18/209, Vratimov 739 32

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MACH. Z. *Výzkum přesnosti výroby tenkostěnných součástí pomocí technologie SLM*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 60 s. Vedoucí práce: Hajnyš, J.

Diplomová práce se zabývá výzkumem přesnosti výroby tenkostěnných profilů pomocí aditivní technologie SLM. Hlavní cíl je určit jaké jsou vhodné parametry pro výrobu a je-li vůbec možné tenkostěnné profily tisknout. Práce se zaměřuje převážně na vliv parametru výkonu laseru a skenovací rychlosti. Výsledkem je porovnání vzorků, měření drsnosti povrchu a rozměrů vzorku a konečné vyhodnocení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MACH, Z. *Research of the Accuracy of Production of High an Thin-walled Parts Using SLM Technology*: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2020, 60 p. Thesis head: Hajnyš, J.

This diploma thesis focuses on the accuracy of the production of thin-walled profiles using additive SLM technology. The main goal is definitely whether there are parameters for production and it is really possible to print thin-walled profiles. We monitor important influences of laser power and scanning speed parameters. The result is the evaluation of samples, measurement of surface roughness and sample dimensions and estimates.

Obsah

Seznamy 8

Úvod 11

2.	Cíl diplomové práce.....	12
3.	Současný stav	13
3.1	Aditivní technologie.....	13
3.2	Výhody a nevýhody aditivních technologií	14
3.3	Využití aditivních technologií v Průmyslu 4.0.	14
4.	Základní typy aditivní výroby	16
4.1	Fotopolymerizace	16
4.2	Řízená energická depozice	17
4.3	Slinování prášků.....	18
4.4	Tryskání materiálu a pojiva.....	18
4.5	Vytlačování materiálu	19
4.6	Laminace plastů	19
5.	Aditivní výroba – Metodou SLM	21
5.1	Laser	22
5.2	Strategie skenování	24
5.3	Nehomogenita povrchu - Balling	25
5.4	Tloušťky vrstvy prášku	26
5.5	Prášek	26
5.6	Vliv parametrů laseru na povrchové vlastnosti materiálu.....	27
5.7	Vliv parametrů na pórovitost a trhliny	28
5.8	Přesnost tenkostěnných profilů vyrobených pomocí SLM	30
5.9	Napětí	31
6.	Experimentální část.....	33
6.1	Popis experimentu.....	33

6.2	Výrobní zařízení.....	34
6.3	Materiál testovacích vzorků	36
6.4	Měření testovacích vzorků	36
6.5	Průběh tisku.....	38
6.6	Měření vzorků	40
6.6.1	Měření vnějších rozměru	41
6.6.2	Měření drsnosti povrchu – Ra, Rz	44
6.6.3	Měření poměrné plošné drsnosti Sa a Sz	47
6.7	Objemová hustota vyzářené energie E_v	50
7.	Vyhodnocení – diskuze.....	52
8.	Závěr	55
9.	Použitá literatura.....	56

Seznamy

Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka SLM tisku VŠB PROTOLAB [3]	14
Obrázek 2 Forma vytištěná za 16 hodin [6]	15
Obrázek 3 Znázornění toku částic na povrch výtisku [9]	17
Obrázek 4 Laserové práškové navařování (šnekového závitu na hřídel) [10]	17
Obrázek 5 Schéma tryskání materiálu a pojiva	18
Obrázek 6 Schéma vytlačování materiálu [12]	19
Obrázek 7 Laminace plastů a) vertikálně pohyblivá tisková podložka, b) a c) zásobníky materiálu, laser, e) optika pro zacílení paprsku a f) vyhřívaný válec, [9]	20
Obrázek 8 Schéma metody SLM	21
Obrázek 9 Typy skenovací strategie – zleva Meander, Stripe, Chessboard [15]	24
Obrázek 10 Postup vytváření Ballingu [18]	25
Obrázek 11 Návary vytvořené pomocí výkonu 50 W a měnící se rychlostí [19]	26
Obrázek 12 Tabulka s výsledky tisku experimentu a) kvalitní tisk b) špatný tisk [21]	29
Obrázek 13 Vzorky tisku jednostopých tenkých vrstev a) fotografie vzorku b) vzorky 2-10 vrstev c) vzorky 10-100 vrstev [21]	30
Obrázek 14 Testovací vzorky - (a) 400 μm , (b) 200 μm , (c) 100 μm , rozdělené na sloupce dle natočení při tisku [22]	31
Obrázek 15 Trhliny vzniklé vnitřím pnutím [23]	32
Obrázek 16 Díl (označen šipkou) nadzvednutý nad úroveň prášku [23]	32
Obrázek 17 Rozvržení vzorků při tisku	33
Obrázek 18 Renishaw AM400 [24]	35
Obrázek 19 Načítání měřeného povrchu v systému Alicona	36
Obrázek 20 Optické měřicí zařízení Alicona G5 [26]	37
Obrázek 21 Posuvné měřítko Kinex	37
Obrázek 22 Nedotisknuté vzorky	38
Obrázek 23 Nedotisknutý vzorek se zborcenou hranou	38
Obrázek 24 Vytištěné vzorky na základové desce	39
Obrázek 25 Průběh tisku na zařízení Renishaw AM400	39
Obrázek 26 3D model vygenerovaný pomocí měření na Alicona G5	40
Obrázek 27 Měřený vzorek na Alicone G5 při 20násobném většení	40
Obrázek 28 Detailní pohled na povrch tisku s kuličkami [5]	41
Obrázek 29 Měření tloušťky vzorku pomocí mikrometru	41

Obrázek 30 Ukázka prohnutí vzorku, vlivem vnitřního pnutí	43
Obrázek 31 Měření Ra a Rz v programu Alicona Messuresuit	44
Obrázek 32 Měření Sa a Sz pomocí zařízení Alicona G5	47

Seznam grafů

Graf 1 Využití AM napříč obory [2].....	13
Graf 2 SLA – stereografie [9]	16
Graf 3 Tloušťky vzorku.....	42
Graf 4 Délky vzorku	43
Graf 5 Výsledné hodnoty Ra vzorku	45
Graf 6 Výsledné hodnoty Rz vzorku	46
Graf 7 Výsledné hodnoty Sa	48
Graf 8 Výsledné hodnoty Sz.....	49
Graf 9 Kombinovaný graf - porovnání hodnot Sa a Ra.....	50
Graf 10 Výsledky Objemové hustoty vyzářené energie pro všechny parametry	51
Graf 11 Porovnání nejlepších a nejhorších vzorku - parametru tloušťky.....	52
Graf 12 Porovnání nejlepších a nejhorších vzorku - parametru Sa	53
Graf 13 Porovnání korelace hodnot Sa s tloušťkou vzorku.....	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry laseru [13].....	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 2 Parametry tisku experimentu - vliv parametru na pórovitost a trhliny [21]	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 3 Parametry tisku	34
Tabulka 4 Parametry tiskárny – Renishaw 400 W [24]..	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 5 Naměřené hodnoty rozměrů vzorku	42
Tabulka 6 Naměřené hodnoty Ra vzorku	45
Tabulka 7 Výsledné hodnoty Rz vzorku.....	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 8 Výsledné hodnoty Sa	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 9 Výsledné hodnoty Sz	48
Tabulka 10 Výsledné hodnoty Objemové hustoty vyzářené energie	51

Seznamy zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
3D	trojrozměrný	
BPP	Beam Parameter Product - parametr paprsku stroje	-
CLIP	Continous Liquid Interface Produciton	-
d	velikost průměru laserového paprsku	[μm]
DED	Direct Energy Deposition – Přímé energetické nanášení	-
DLP	Digital Light Processing – Digitální zpracování světlem	-
DoE	Design of Experiment	-
E	hustota laserové energie	[$\text{J}\cdot\text{mm}^2$]
FDM	Fused Deposition Modeling – Elektroerozivní obrábění	-
h	rozteč skenování	[mm]
I	intenzita laserového paprsku	[$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
M ²	kvalita paprsku	-
MPP	Multiphoton Polymerization	-
P	výkon laseru	[W]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
r _f	poloměr zaostření laserového paprsku	[mm]
Rz	největší výška profilu	[μm]
Sa	aritmetická výška plochy	[μm]
SLA	Stereolytography – Stereolitografie	-
SLM	Selective Laser Melting – Selektivní tavení laserem	-
Sz	aritmetická výška plochy	[μm]
t	tloušťka práškové vrstvy	[mm]
v	skenovací rychlost laseru	[mm·s ⁻¹]
λ	vlnová délka laseru	[nm]

Úvod

Aditivní technologie je moderní způsob, který umožňuje výrobu a tvorbu geometricky a tvarově složitých dílů, které by se jinými technologiemi vyráběly obtížně. Obor aditivní technologie zaznamenal v posledních letech obrovský růst a je stále zdokonalován. Jeho potenciál je využíván napříč celým průmyslem, který spočívá ve svobodě a přesnosti navrhovaných dílů. Aditivní výroba vyžaduje, aby konstrukce výrobku neobsahovala pouze tvar konstrukce, ale i technologické parametry nebo naopak, aby konstrukce byla provedena s ohledem na technologické možnosti (výhody) aditivních technologií. Vzhledem k nákladnosti celé technologie, je potřeba při tisku dosáhnout nejlepších parametrů pro tisk. To znamená co největší přesnost tisku, při využití minimálního množství prášku a času výroby dané součásti [1].

Selective laser melting (SLM) je aditivní metoda, která se nejčastěji využívá pro tisk různých kovů. Výroba metodou SLM je srovnatelná s konvekčními technologiemi výroby, co se týče mechanických vlastností a rozměrových tolerancí.

Tato práce se zabývá analýzou výroby tenkostěnných profilů metodou SLM, a to hlavně vlivu nastavení podmínek tisku. Testovací vzorky budou vyrobeny na zařízení Renishaw AM400 z materiálu 316L.

2. Cíl diplomové práce

Hlavním cílem této diplomové práce je studium tisku pomocí metody SLM se zaměřením na tisk tenkostěnných profilů. Budeme zkoumat, kde jsou hranice možnosti tisku tenkých profilů a jaká je konečná kvalita tisku. Pozornost bude hlavně věnována dvěma hlavními nastavením procesních parametrů: výkonu laseru a skenovací rychlosti. Cílem je zjistit, jak velký mají vliv na výslednou kvalitu a přesnost tisku. Získané výsledky na základě provedeného experimentu by měli najít uplatnění v praxi, případně v akademické sféře pro další diplomové práce a rozvinutí tohoto tématu.

Etapy vedoucí k cíli diplomové práce:

- provést analýzu současného stavu SLM technologie
- seznámit se s důležitými procesními parametry SLM tisku
- navrhnout a provést experimentální tisk testovacích vzorků
- vyhodnotit experiment – testovací vzorky
- stanovit přínos pro praxi

3. Současný stav

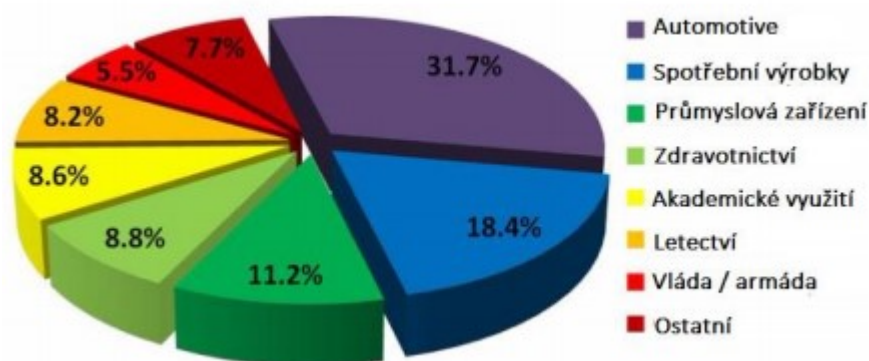
3.1 Aditivní technologie

Aditivní výroba je rapidně rozvíjející se obor, který v dnešní době napomáhá s produkcí tvarově složitějších a kvalitnějších dílů. Synonymum pro aditivní technologie je 3D tisk nebo rapid prototyping, ačkoliv tyto označení jsou většinou označovány procesy, při kterých vzniká pouze prototyp, nikoliv konečný výrobek.

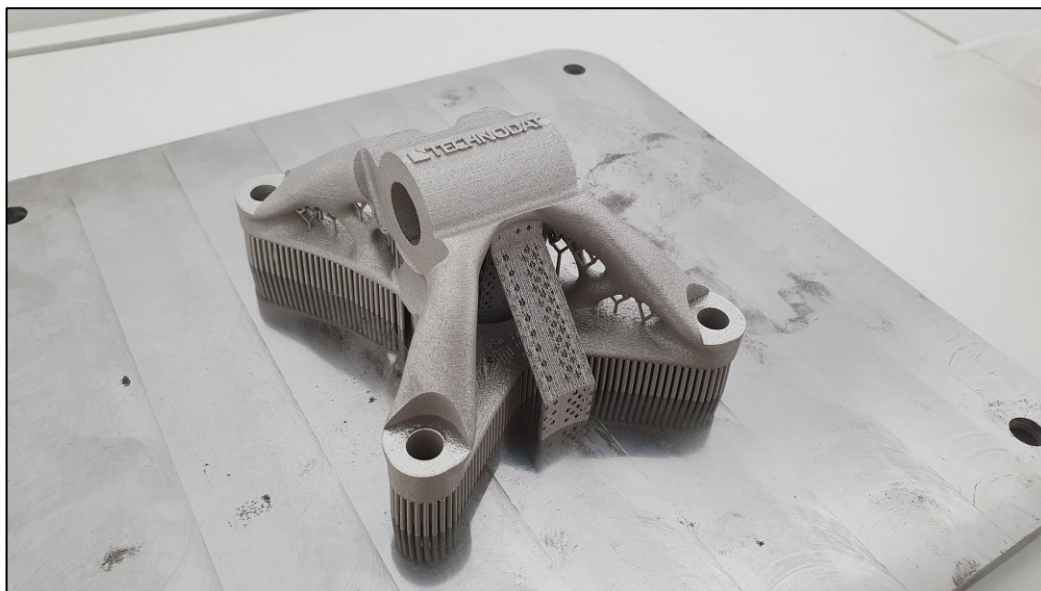
Tato technologie spočívá v postupném spojování materiálu po jednotlivých vrstvách, které jsou definovány pomocí softwaru z 3D modelu. Na rozdíl od klasických konvekčních technologií zde nedochází k ubírání materiálu, ale k jeho přidávání.

Aditivní technologie se využívá na celém světě napříč všemi obory viz. Graf č.1. Je využíván například i pro kosmický výzkum, kde se uvažuje, že by astronauti byli schopni vytisknout si během pobytu ve vesmíru například náhradní díly. Ve zdravotnictví jsou dnes běžně využívány pro tisk zubních náhrad či protéz končetin.

Moderní alternativní využití je například v módním průmyslu, potravinářském průmyslu, kde se dají tisknout cukrovinky anebo v architektuře, kde italský vynálezce Enrico Dini vymyslel tiskárnu, která za pomoci písku a anorganického pojiva, dokáže vytvořit materiál podobný mramoru a tisknout tedy sochy, bazény, pomníky a menší stavby [2].



Graf 1 Využití AM napříč obory [2]



Obrázek 1 Ukázka SLM tisku VŠB PROTOLAB [3]

3.2 Výhody a nevýhody aditivních technologií

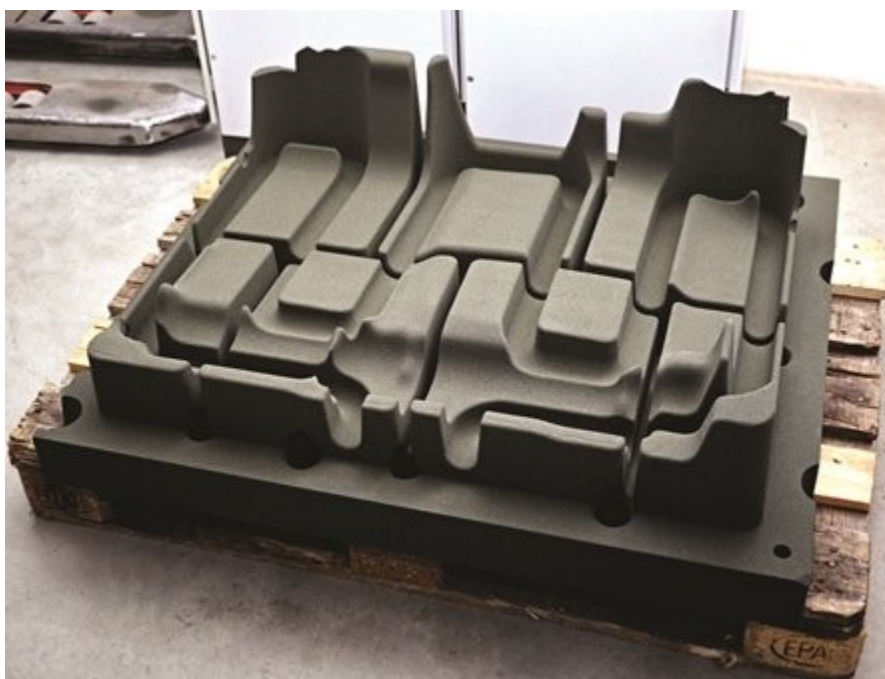
Hlavní výhodou aditivních technologií je výroba tvarově složitých dílů, které bychom buď obtížně vyráběli pomocí konvekčních technologií anebo museli vyrobit a složit z více částí. Vzhledem k tomu, že výroba probíhá v jednom kroku, je levnější a produkuje o 75 % méně odpadu. Jsou vhodné pro tvorbu prototypu a tzv. kusovou výrobu.

Nevýhodou aditivních technologií je rychlost výroby, kdy není vhodná pro výrobu velkých sérií, ale tedy pouze pro série menší či pro již výše zmíněnou prototypovou výrobu. Oproti klasické konvekční výrobě jsou omezené možnosti výběru materiálu a tím i výsledné vlastnosti výrobku. V případě potřeby kombinovat více druhů materiálu najednou vznikají komplikace dané rozdílnými vlastnostmi materiálu co se týče tepelné a tokové charakteristiky daného materiálu. V tomto případě je potřeba využít jiné technologie výroby [4][5].

3.3 Využití aditivních technologií v Průmyslu 4.0.

Aditivní technologie mají velký význam v tzv. Průmyslu 4.0. (4. průmyslová revoluce). Nachází v něm velké uplatnění s ohledem na požadavky trhu, jako je flexibilita výroby, která dokáže fungovat poloautomaticky.

Klasické schéma výroby obsahuje konstrukci dílu, příprava výroby dílu a samotnou výrobu. Výhoda aditivní technologie je v tom, že konstrukce výrobku neobsahuje pouze výsledný tvar výrobku, ale také technologické parametry, které jsou určeny s ohledem na technologické možnosti aditivní výroby. Z toho vyplývá, že příprava výroby z výrobního schématu odpadá a je rozdělená již do konstrukce a jednak do vyšší inteligenci stroje. Díky aditivní výrobě se celý vývojový proces urychluje revolučním způsobem z týdnu na dny. Máme přesný odhad množství potřebného materiálu, minimální odpad, což usnadňuje řízení výroby a zjednodušuje ekonomické a skladové hospodářství. Zavádění vlastní výroby je díky vyšším pořizovacím nákladům 3D tiskáren sice dražší, ale celkové náklady jsou ve výsledku nižší. Ukázkou urychlení výroby je například forma na odlévání viz. Obrázek č.2. [6][7].



Obrázek 2 Forma vytištěná za 16 hodin [6]

4. Základní typy aditivní výroby

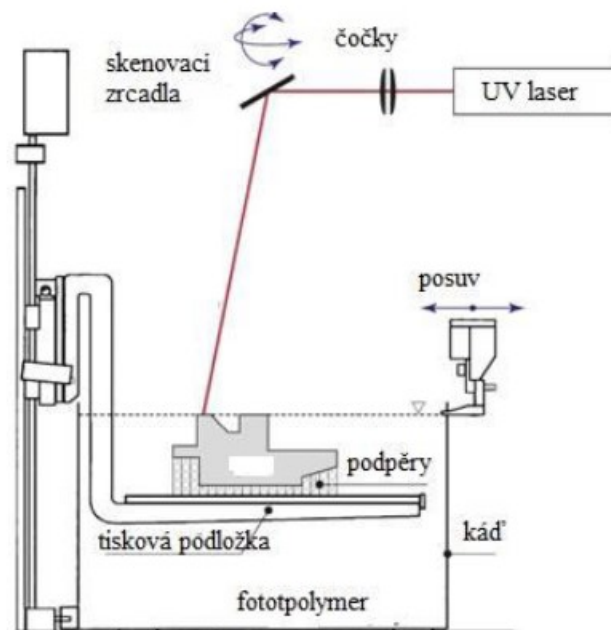
Rozlišujeme tyto základní typy aditivní výroby, které se liší dle formy nanášení vrstev materiálu a dle tisknutého materiálu:

4.1 Fotopolymerizace

Fotopolymerizace patří mezi nejstarší aditivní technologie, které využíváme. Anglicky se označuje Vat Photopolymerization a funguje na principu vytvrzení fotopolymeru pomocí světelné energie, nejčastěji UV záření. Postupné zaměřování světelného paprsku na určité místo vzniká částečně vytvrzený materiál, který se vytvrzuje vrstvu po vrstvě. Je to jedna z nejpřesnějších metod 3D tisku, protože teoretická přesnost se rovná velikosti molekuly polymeru. Hlavní výhodou je hladký povrch a nevýhodou, že součást se musí po vytištění nechat vytvrdit (tzv. musí projít post procesingem) [8].

Dělí se na:

- SLA – Stereografie
- DLP – Digital light Processing
- CLIP – Continous Liquid Interface Produciton
- MPP – Multiphoton Polymerization

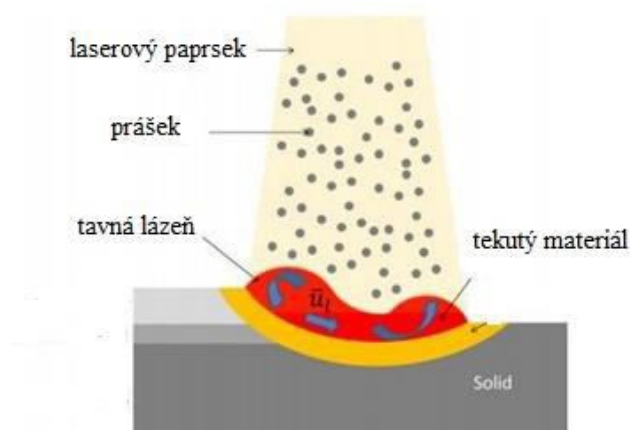


Graf 2 SLA – stereografie [9]

4.2 Řízená energetická depozice

Je jedna z nejčastěji využívaných aditivních technologií pro tisk kovů. Označuje se jako DED (Direct Energy Deposition). Tato technologie funguje na principu sintrování jednotlivých vrstev materiálu. Materiál pro tisk je ve formě prášku nebo drátu. Metoda funguje na principu podobném svařování, kdy je přes trysku dávkován materiál, který je roztavená pomocí vysokoenergetického zdroje. Jako zdroj se nejčastěji využívá svazek elektronu, el. oblouk, případně i laser. Tímto procesem se na povrch navaří vrstva materiálu.

Výhoda této technologie spočívá ve vysoké kvalitě tisknutých dílů, s vysokou hustotou a čistotou materiálu. DED je vhodný na opravu součástí, výrobu dílu pro armádu, letectví a zdravotní průmysl. Nejčastěji využívané materiály jsou ocel, slitiny hliníku a slitinu titanu.[9]



Obrázek 3 Znázornění toku částic na povrch výtisku [9]



Obrázek 4 Laserové práškové navařování (šnekového závitu na hřídel) [10]

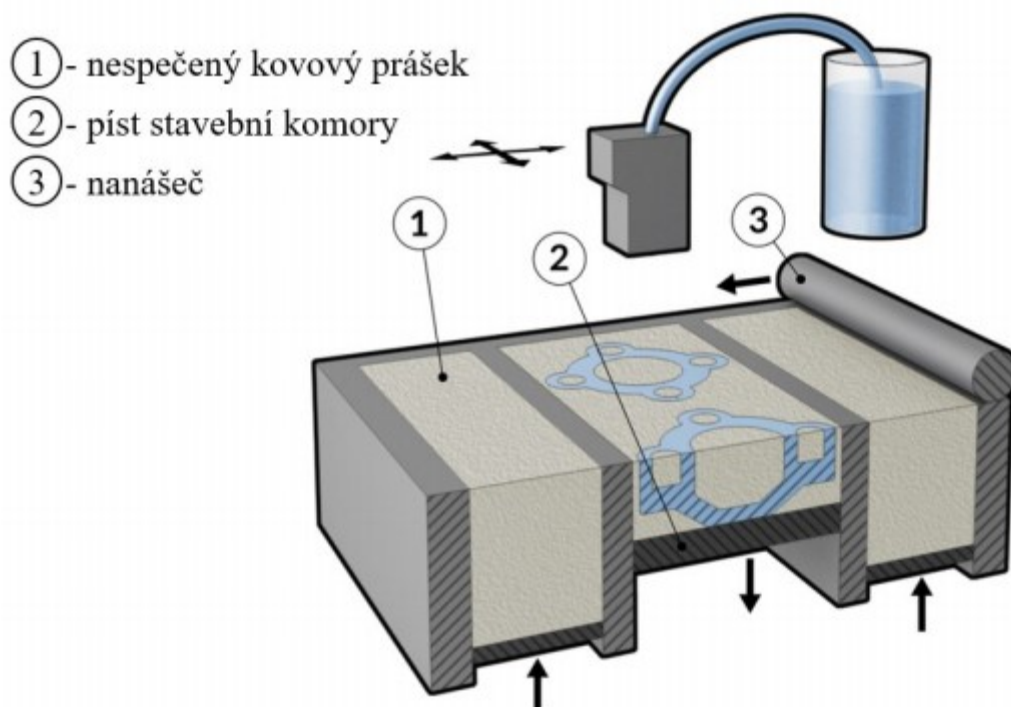
4.3 Slinování prášků

Slinování prášku patří stejně jako DED mezi nejvyužívanější aditivní technologie pro svařování kovů. Na rozdíl od DED tato technologie umí zpracovat i keramiku a polymery, a to ve formě prášku. Materiál je spékán hlavně pomocí laseru a do pracovního prostoru je dávkován pomocí stěrky. [11]

Detailněji je tato metoda popsána v kapitole Aditivní výroba – Metoda SLM

4.4 Tryskání materiálu a pojiva

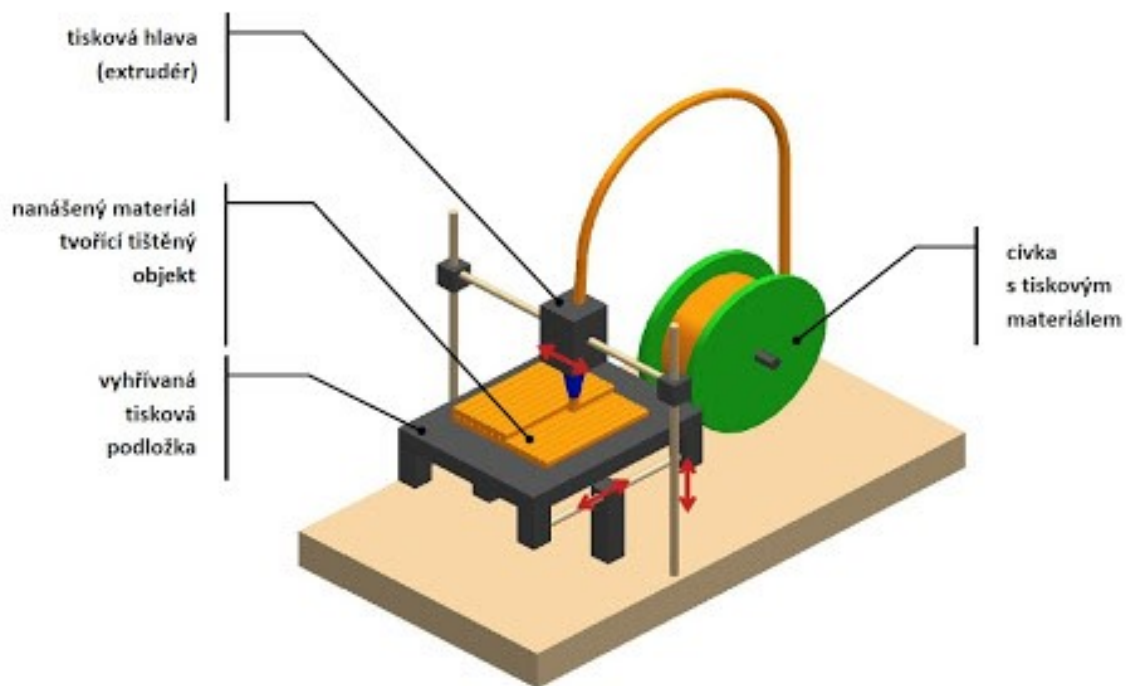
Tato aditivní technologie využívá při tisku dva materiály. Jeden materiál je stavební pevná složka, kterou je kov případně keramika, a druhou složkou je pojivo, které je většinou v tekuté formě. Tisk probíhá tak, že tryskací hlava střídavě nanáší materiál a pojivo, které postupně vytváří vrstvy součástky. Nevýhoda této technologie je, že výsledný produkt je pórovitý, má horší mechanické vlastnosti a produkt musí projít tzv. post processingem, který ve výsledku tvrdá déle než samotný tisk. [9]



Obrázek 5 Schéma trykání materiálu a pojiva

4.5 Vytlačování materiálu

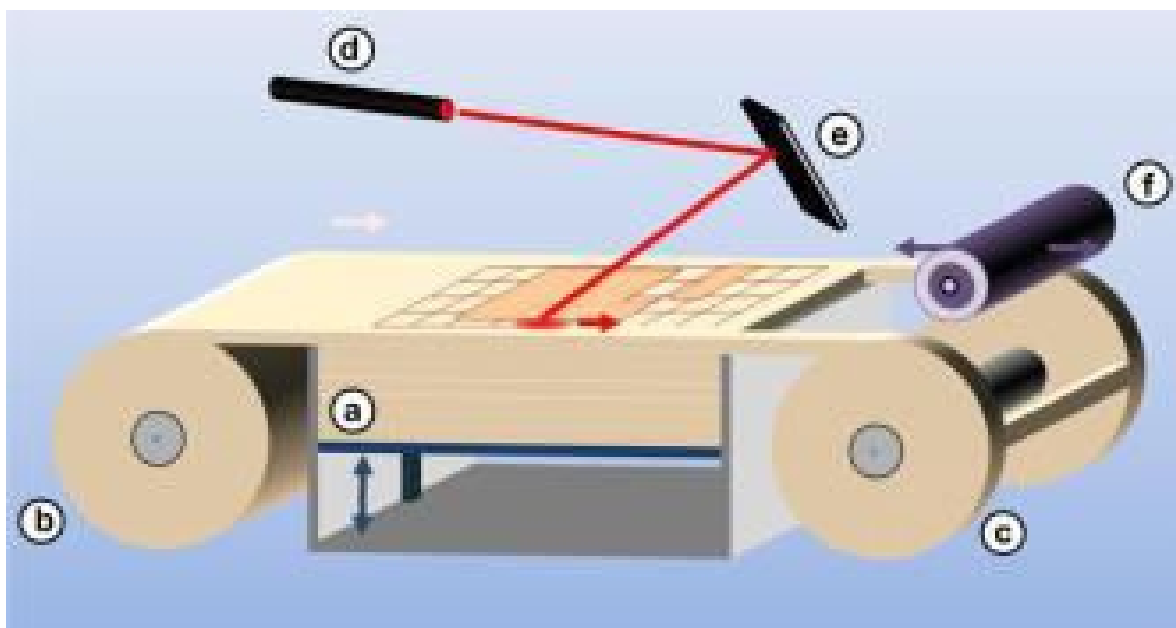
Tisk formou vytlačování materiálu je nejvyžívanější aditivní technologii po celém světě. Tato forma 3D tisku patří pořizovací cenou k nejdostupnějším na trhu, jak svatebním materiálem, tak tiskárnou samotnou. Nejčastějším stavebním materiálem je termoplast ve formě struny. Při této metodě je materiál roztaven a pomocí trysky vytlačován a vrstven do požadovaného tvaru. Nejčastější označení je FDM. [12]



Obrázek 6 Schéma vytlačování materiálu [12]

4.6 Laminace plastů

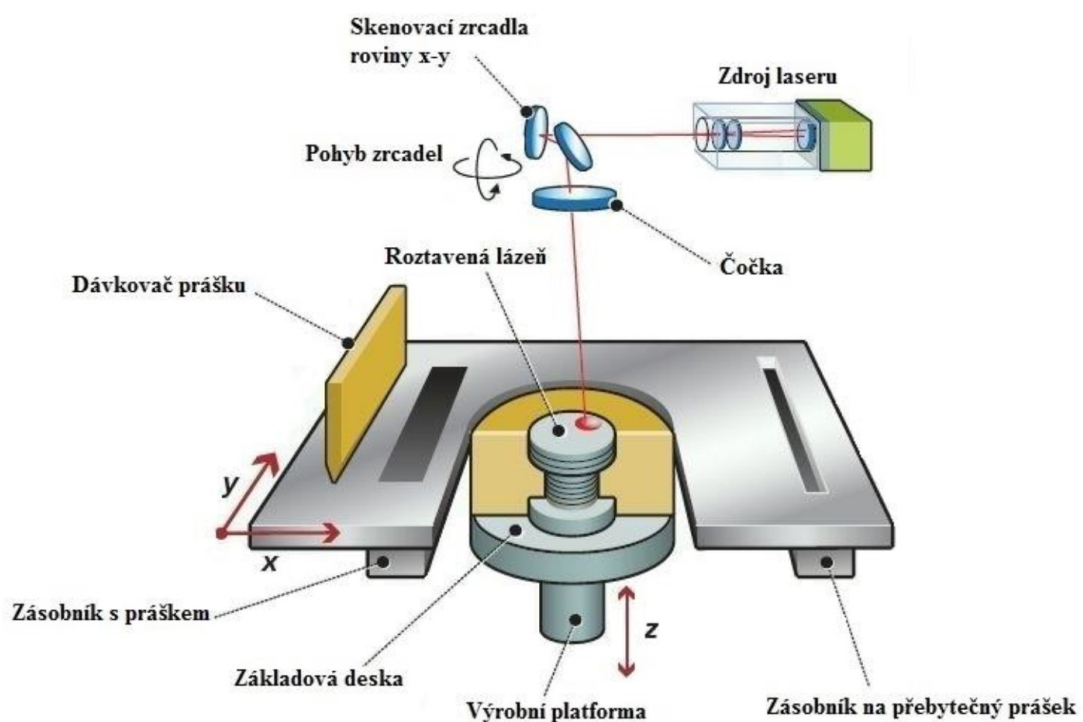
Tato aditivní technologie je atypická v tom, že se nenanáší materiál postupně bod po bodu ale ve velkých tenkých plátech. Funguje to na principu, kde je základní materiál odvíjen z cívky a pomocí laseru vyřezán, zbytek materiálu se navine na sekundární cívku a vrstva je pomocí vyhřívaného válce přitavená k té předchozí. Tato technologie je levná a vhodná na tisk velkých objektů [9].



Obrázek 7 Laminace plastů a) vertikálně pohyblivá tisková podložka, b) a c) zásobníky materiálu, laser, e) optika pro zacílení paprsku a f) vyhřívaný válec, [9]

5. Aditivní výroba – Metodou SLM

Metoda SLM (Selective Laser Melting) je metoda, která využívá laser k natavení vrstvy kovového prášku. Princip tisku spočívá v tom, že první vrstva prášku je na základové desce (která leží v rovině os X a Y), kterou laser roztaví a vznikne první vrstva. Poté základová deska klesne ve svislé ose Z, a dávkovač předehřátého prášku vytvoří novou vrstvu prášku. Další vrstvy vznikají roztavením prášku pomocí laseru na předchozí vrstvě a jejím rychlým ztuhnutím. Každá vrstva má definovanou tloušťku. Tímto způsobem postupně vrstvu po vrstvě vznikne hotový díl. [6]



Obrázek 8 Schéma metody SLM

Hotový díl má hrubý povrch, proto je potřeba ho pomocí dokončovacích operací upravit (leštění, broušení atd.)

5.1 Laser

V procesu SLM je nejvhodnější pro přenos tepla laserový paprsek, ten dokáže přenést velké množství energie na jeden daný bod. Průměr laserového paprsku nám určuje velikost daného bodu, a ten jde různě měnit pomocí softwaru řídicího tiskárny.

Čím je průměr laseru menší, tím větší je hustota energie dopadá na daný bod a výsledný díl má větší pevnost, na úkor prodloužení doby potřebné pro vytisknutí dílu.

Mezi hlavní procesní parametry metody SLM patří výkon laseru a skenovací rychlost. Čím je vyšší výkon laseru, tím větší teplo je vnesené do materiálu a ten je více natavený, a čím je vyšší skenovací rychlost, tím se krátí potřebný čas potřebný k ohřevu materiálu. Tím pádem tepelně ovlivněná oblast je menší mimo oblast taveniny. Ideální poměr výkonu laseru a skenovací rychlosti je pro tisk velmi důležitý.

Mezi další parametry sledované u laserového paprsku je jeho intenzita I . Tato intenzita je definována výkonem daného laseru a zvoleným průměrem paprsku. Intenzitu laserového paprsku, lze vypočítat pomocí této rovnice (5.1):

$$I = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2} [\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}], \quad (5.1)$$

- kde P je výkon [W], a d průměr paprsku [mm],

U metody SLM se ovšem obvykle používá laserů, jež nemají kruhový tvar, ale tzv. gaussovský profil záření. Pomocí výpočtu kvality paprsku M^2 , lze zjistit, jak moc se tvar vybraného laseru blíží ideálnímu gaussovu tvaru profilu.

K výpočtu parametru kvality paprsku M^2 je nejprve potřeba znát parametr paprsku stroje BPP. K určení tohoto parametru se využívá tento vzorec (5.2):

$$BPP = \vartheta_h \cdot r_f = \vartheta_h \cdot \frac{d}{2}, \quad (5.2)$$

kde ϑ_h je odchylka úhlu a r_f představuje poloměr zaostření paprsku. Po vypočítání parametru paprsku stroje. Lze určit kvalitu paprsku M^2 . Tu definuje rovnice (5.3.):

$$BPP = \vartheta_h \cdot r_f = \vartheta_h \cdot \frac{d}{2} \quad (5.3)$$

Dalším z řady sledovaných parametrů laserového zdroje je vlnová délka laseru označovaná jako λ , jenž vyznačuje schopnost daného kovového prášku absorbovat energii laseru. [13]

Tabulka 1 Parametry laseru [13]

Parametr laseru	Označení	Jednotka
Výkon laseru	P	W
Velikost laserového paprsku	D	μm
Intenzita	I	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Kvalita paprsku	M^2	-
Vlnová délka	λ	nm
Druh laseru	kontinuální, pulsní	-

Nejčastěji se však využívají dva druhy zařízení regulující laserový tok. A to zařízení pro kontinuální tok a pro tok pulsní. Druh zvolného toku určuje množství vyzářené energie. [13]

5.2 Strategie skenování

Při natavování základního materiálu vzniká z důvodu prudkého ohřevu a následně ochlazení v materiálu zbytkové napětí, které následně může způsobovat deformace, praskliny a distroze. Zvolením správné skenovací strategie lze toto napětí snížit. Rozlišujeme tyto základní typy skenovací strategie:

- **Strategie Meander** – Kde vektory jsou paralelní a skenování probíhá kontinuálním směrem, tato strategie je vhodná pro tisk malých a tenkostěnných dílů, protože skenovací vektory jsou-li dlouhé, víc vzniká zbytkové napětí.

- **Strategie Chessbord**, - Funguje na principu rozdělení plochy na jednotlivé čtverce, jako na šachovnici, s tím že vedlejší čtverec má skenovací strategii pootočenou o 90°. Tato metoda je speciálně navržena pro snížení zbytkových napětí. Mezi jednotlivými vrstvami se doporučuje pootočit strategii skenování. Doporučeno je o 67°. To má za následek snížení možnosti vzniku pórovitosti.

- **Strategie Stripe** - Je podobná metodě Meander, Plocha je rozdělená na pruhy, které se po sobě skenují, tím pádem je dráha přerušovaná, což má za následek nižší zbytkové napětí. Tato metoda je vhodná pro objemnější dílce a je rychlejší než metoda Chessboard

Zvolená skenovací strategie má vliv na konečné parametry tisku, proto je důležité ke každé zvolené strategii zvolit odpovídající parametry tisku.[14]

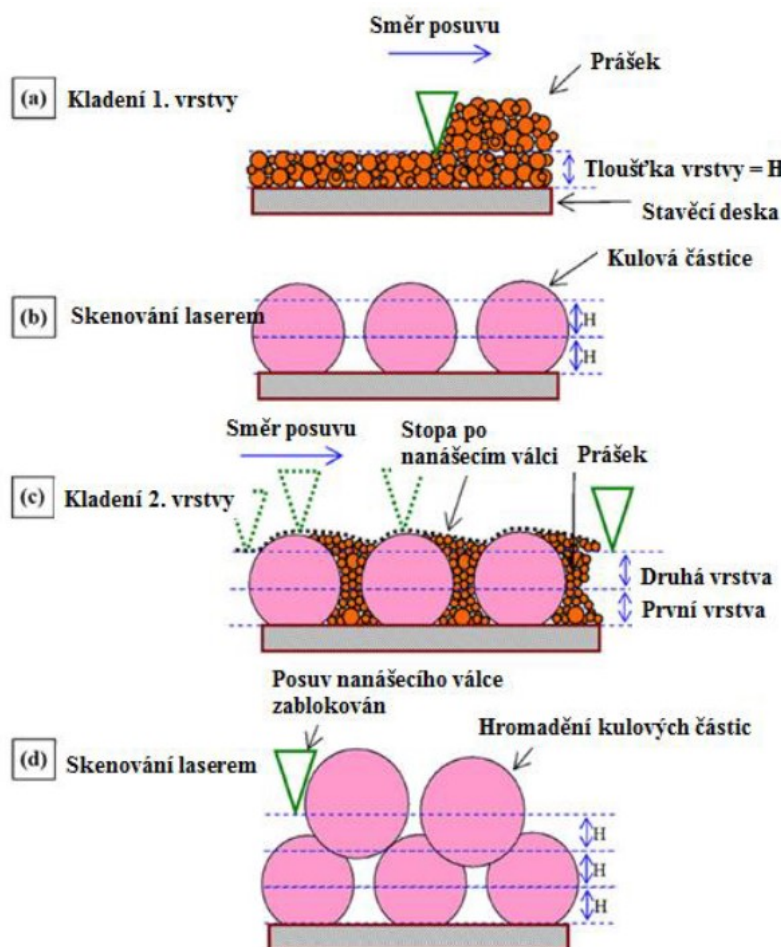


Obrázek 9 Typy skenovací strategie – zleva Meander, Stripe, Chessboard [15]

5.3 Nehomogenita povrchu - Balling

Jeden z častých jevů nehomogenního povrchu, který se objevuje jako tzv. balling (kuličkování). Povrchové napětí roztaveného materiálu jej nutí k minimalizování povrchové energie na co nejnížší hodnotu. Během tohoto jevu, se tavná lázeň ve směru tavení začne oddělovat od substrátu a vytvářet na povrchu kuličky (viz. Obrázek 10) [16][17].

Balling vzniká i díky znečištění prášku, jako je například vlhkost, oxidické a nitridované vrstvy na povrchu částic, organické látky a adsorbované plyny. Nadále nevhodnými podmínkami tisku jako jsou nízký výkon laseru, vysokou skenovací rychlostí nebo velkou tloušťkou nanesené vrstvy. V případě že bychom vytvořili opačné podmínky, a to vysoký výkon laseru a pomalou skenovací rychlost hrozí nám další poškození povrchu jevem zvaným „klíčová dírka“ kdy dochází k vypařování materiálu. [16][17]

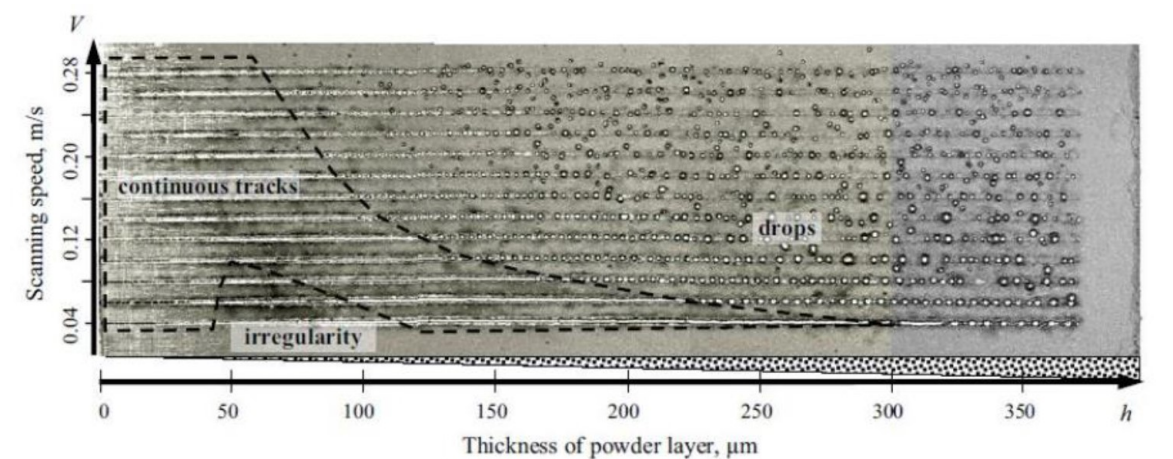


Obrázek 10 Postup vytváření ballingu [18]

5.4 Tloušťky vrstvy prášku

Další z důležitých parametrů je tloušťka nanášené vrstvy prášku. Tímto se zabýval Yadroitsev a kol. [19], který vytvořil test, který se skládal z lineární návaru na platformě, která byla pod úhlem. Takto vznikl plynulý přechod od nejtenčí po nejhrubší vrstvu. Jednotlivé vrstvy byly skenovány stejným výkonem, ale rozdílnou rychlostí.

Výsledek se skládá ze tří částí (Obrázek 11), kde na první části vznikl tzv. balling efekt, který v důsledku napětí v roztaveném kovu, a materiál se snaží dosáhnout optimální poměr mezi povrchem a objemem. Tento jev má za následek narušení homogenity toku materiálu a dochází ke vzniku oddělených kuliček. Ve výsledku je pak povrch pórovitý, což má špatný vliv na mechanické vlastnosti povrchu. V druhé části lze vidět nekontinuální návar díky přetavení malé vrstvy prášku. Třetí část je souvislý návar, který nevykazuje téměř žádný defekt. [19]



Obrázek 11 Návary vytvořené pomocí výkonu 50 W a měnící se rychlostí [19]

5.5 Prášek

U metody SLM se využívá sypkého kovového prášku, jehož vlastnosti mají vliv na kvalitu vyráběného modelu. Mezi nejdůležitější parametry pro správnou tvorbu práškové vrstvy patří: tvar částic, distribuce částic a jejich velikost. Pro prášek je důležitá jeho pýchovací hustota - čím menší částice, tím je pýchovací hustota lepší. Je potřeba, aby částice prášku byly menší než tloušťka tištěné vrstvy, ale zároveň nesmí být z bezpečnostních důvodů moc malé.

Metoda SLM využívá pro tisk různé druhy materiálu, od korozivzdorné až nástrojové oceli, měď, hliník, titan, kobalt – chrom nebo zlato. Pro tisk má prášek velikost částic mezi 15-45 mikrony.

Rozlišují se čtyři způsoby výroby práškového materiálu. Způsob, jakým je prášek vyráběn má významný vliv na jeho konečné fyzikální a technologické vlastnosti. Prášek lze vyrobit mechanickým způsobem, mechanicko-fyzikálním způsobem, chemickým způsobem, fyzikálně-chemickým způsobem.

Při skladování prášku, je důležité dbát na to, aby byl skladován v chladném a suchém prostředí. Nádoba, ve které uskladněn by měla být nehořlavá a hermeticky uzavřená.

Materiálem využívaným v tomto experimentu je prášek 316L, což je korozivzdorná ocel, jenž se vyznačuje vysokou tvrdostí a houževnatostí. Další vlastností, jenž je typická pro tento materiál je jeho velmi dobrá obrobiteľnosť.

5.6 Vliv parametrů laseru na povrchové vlastnosti materiálu

Jak již bylo zmíněno, parametry jako výkon laseru a skenovací rychlost mají vliv na konečnou kvalitu vytvářených modelů. Samotná kvalita povrchu má vliv na opotřebení, únavu a životnost vyráběné součásti.

Khan a kol. [20] ve svém výzkumu zjišťovali závislost kvality povrchu na hustotě laserové energie. Ta se určuje podle rovnice (5.4):

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^2] \quad (5.4)$$

kde: E – hustota laserové energie [$\text{J} \cdot \text{mm}^2$]

P – výkon laseru [W]

v – skenovací rychlost laseru [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

h – rozteč skenování [mm]

t – tloušťka práškové vrstvy [mm]

Při jejich výzkumu byla zkoumána výsledná dráha po zchlazení taveniny při různých parametrech rychlosti skenování a výkonu laseru. Jejich práce ukazuje na různou podobu struktury a šířky laserové stopy s měnícími se parametry.

Dle závěrů z jejich studie se při použití parametrů, jejichž vypočtená hustota laserové energie byla nižší, vykazoval povrch větší pórovitost, výskyt trhlin a kráterů. Zatímco parametry s vyšší hustotou energie vykazovaly lepší povrchové charakteristiky.

Už jen z těchto poznatků je patrné, jak moc ovlivňují zvolené procesní parametry laseru konečnou strukturu a kvalitu modelované části. Jak vyplývá dále ze závěrů, jenž uvádí ve svých poznatcích Peng a kol., [21] má zvolená hustota laserové energie vliv i na mikrostrukturu a mikro tvrdost konečného produktu.

Z jejich poznatků vyplývá, že zvyšující se výkon laseru má vliv na zvýšení hrubosti koncové struktury. Naopak průměrná mikro tvrdost materiálu se snižovala [21].

5.7 Vliv parametrů na pórovitost a trhliny

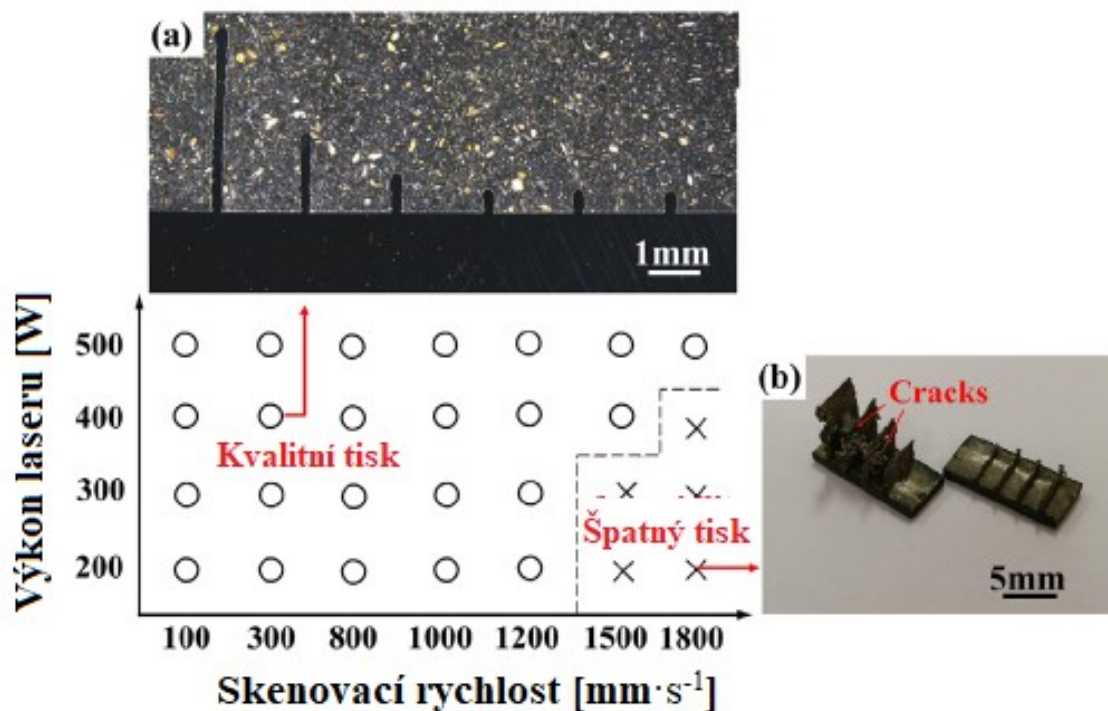
Parametry tisku mají značný vliv na pórovitost a trhliny v materiálu. Huihui a kol. [22] vytvořili experiment, ve kterém vytiskli několik skupin vzorku z materiálu Inconel 718 tenkostěnných profilů s různými parametry tisku (Tabulka č.1)

Tabulka 2 Parametry tisku experimentu - vliv parametru na pórovitost a trhliny [22]

Skupina	Výkon [W]	Skenovací rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Tloušťka [μm]
Tenkostěnné vzorky	200-500	100-1800	40
Jednostopá vrstva	200-500	100-1200	40

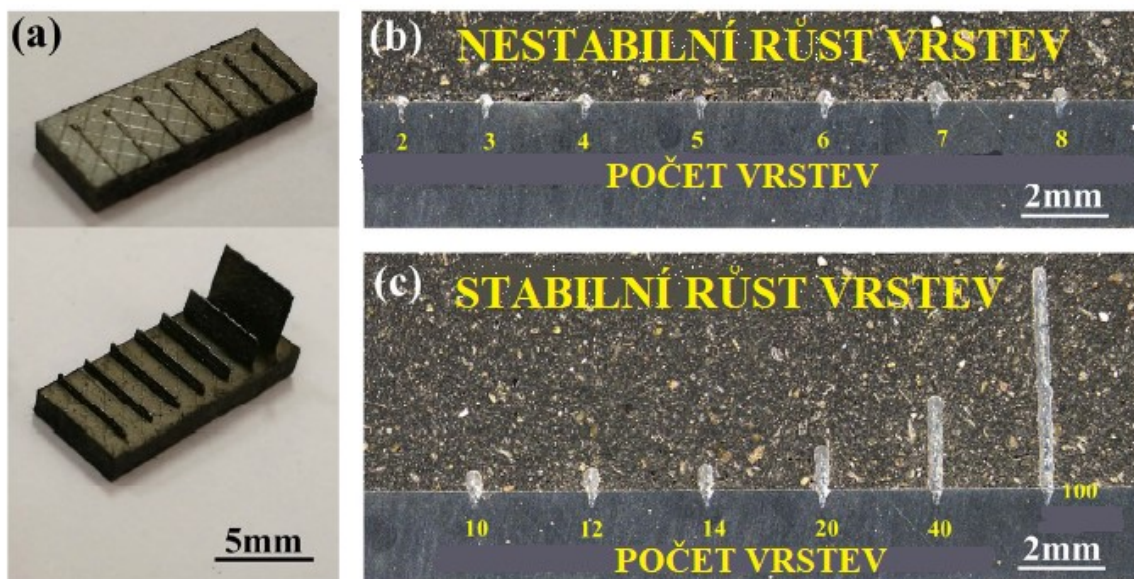
Výsledky experimentu tisku tenkostěnných profilů ukázaly (Obrázek 12), že vzorky při výkonu laseru v rozsahu 200-500W a skenovací rychlosti 100-1500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, jsou bez viditelných trhlin a póru, ale při vysoké skenovací rychlosti v rozsahu 1500-1800 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a výkonu laseru 200-400 W se již projevuje špatná tisknutelnost tenkostěnných vzorků, na kterých se objevují praskliny a tzv. balling.

Špatné vzorky jsou způsobené vysokou rychlostí skenování při nízkém výkonu laseru, při tomto poměru parametrů se roztavený materiál nestíhá spojovat a vznikají oddělené kapičky (balling), které se nedokážou spojit v souvislou vrstvu, tím pádem má povrch velkou drsnost a jsou v něm trhliny.



Obrázek 12 Tabulka s výsledky tisku experimentu a) kvalitní tisk b) špatný tisk [22]

Při tisku jednostopých tenkých vrstev, byly všechny vzorky ve výškách v rozsahu 2-100 vrstev, vytištěné s kvalitním povrchem. Tloušťka vzorku je do 10 vrstvy nepřesná, jakmile tisk přesáhne 10 vrstev je tloušťka vzorku jednotná (Obrázek 13) [22].

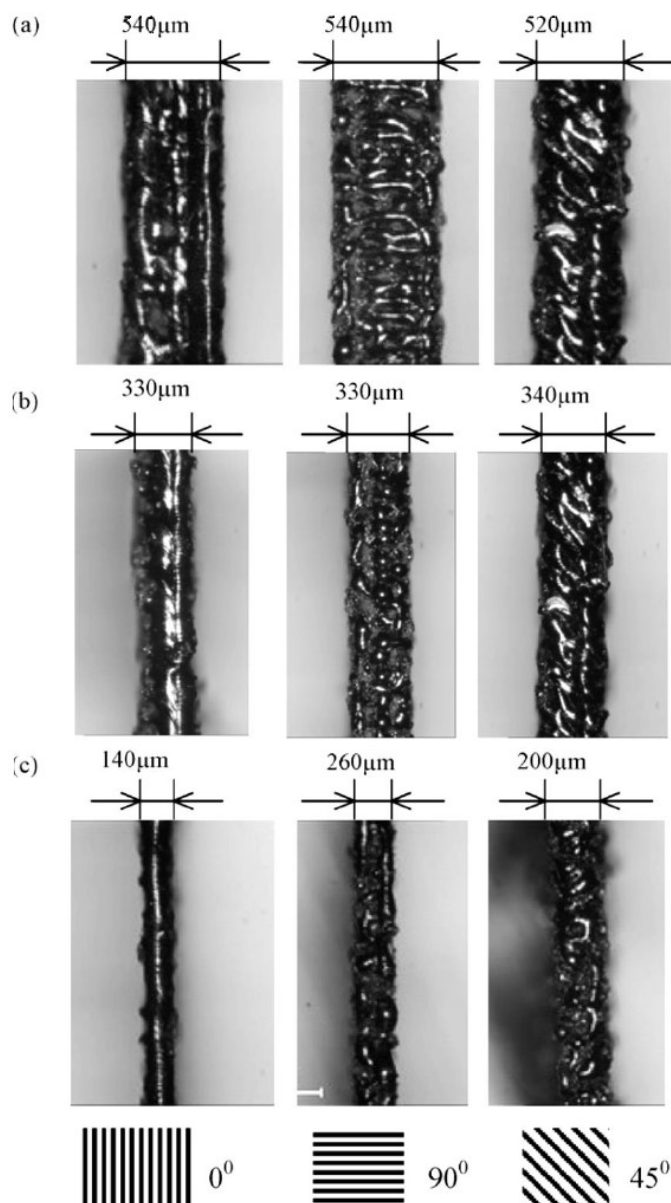


Obrázek 13 Vzorky tisku jednostopých tenkých vrstev a) fotografie vzorku b) vzorky 2-10 vrstev c) vzorky 10-100 vrstev [22]

5.8 Přesnost tenkostěnných profilů vyrobených pomocí SLM

Přesnost výroby tenkostěnných profilů závisí na vhodném poměru dvou hlavních parametrů tisku - výkonu laseru a skenovací rychlosti. Touto problematikou se zabýval Yadroistev a kol. [23], kteří zkoušel experiment se vzorky z korozivzdorné oceli Inox 904L o rozměrech 20x5mm s proměnlivými tloušťkami 100 μm , 200 μm a 400 μm . Experiment byl proveden při výkonu laseru 50 W a rychlosti skenování 140 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Poslední proměnlivý parametr bylo natočení vzorku na základové desce v ose Z.

Bylo zjištěno, že toto natočení má při tisku vliv na výslednou tloušťku stěny a kvalitu povrchu vzorku (viz. Obrázek 14) Naměřené hodnoty tloušťky jsou zkreslené z pohledu shora, z důvodu ballingu. – kde je měřena tloušťka vzorku včetně kuliček, ale tato hodnota neodpovídá reálné tloušťce v průřezu. Tyto výsledky mohou být rozdílné pro různé typy prášku, typ tiskárny atd. [24].

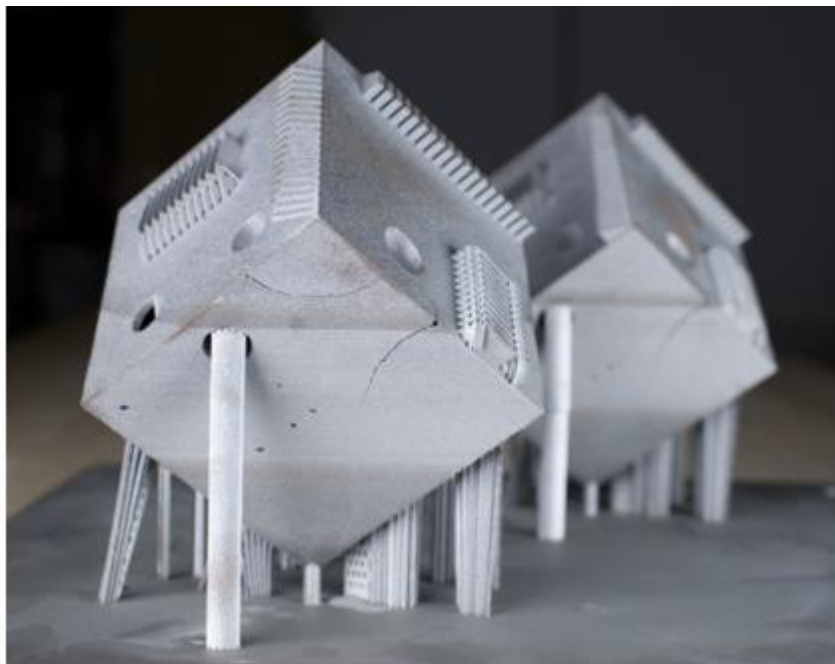


Obrázek 14 Testovací vzorky - (a) 400 μm , (b) 200 μm , (c) 100 μm , rozdělené na sloupce dle natočení při tisku [23]

5.9 Napětí

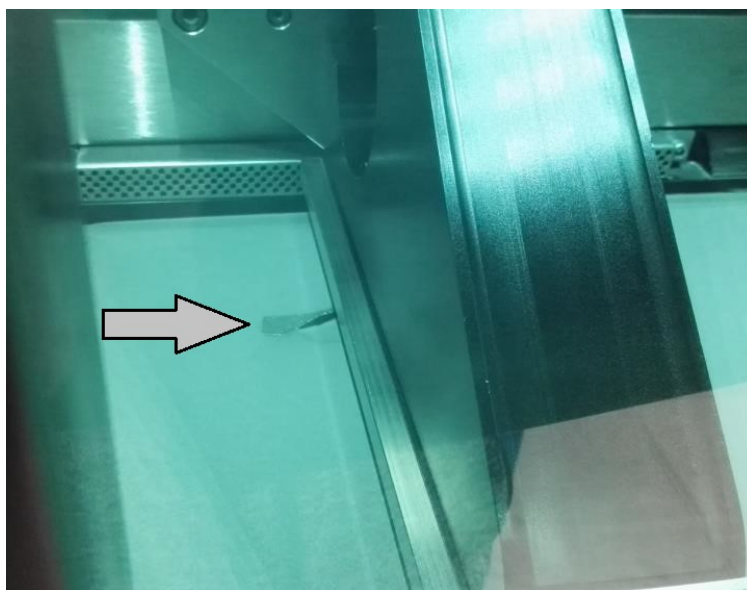
Vnitřní napětí ve vytištěných dílech je častý jev, který nikdy nelze odstranit, avšak lze jej výrazně snížit. Velký vliv má použitý materiál a také velikost dílu (čím větší díl, tím horší odvod tepla). Již během přípravy lze pnutí snížit, a to vhodným rozmístěním podpěrných struktur, zvolením vhodné strategie a parametrů tisku a množstvím tisknutých dílů. Čím víc součástí se tiskne naráz, tím má každý díl víc času na chladnutí mezi jednotlivými skenovacími přejezdy. Po vytištění lze součást ideálně okamžitě po vytištění tepelně zpracovat včetně podpor a základové desky, ať předejdeme deformaci po odřezání dílu [24].

Ukázka vnitřního pnutí, které vzniklo z důvodu nedostatečného množství podpor, které by dostatečně odváděly teplo a předešlo by se vzniku prasklin (viz Obrázek 15).



Obrázek 15 Trhliny vzniklé vnitřním napětím [23]

Vlivem rozdílu teplot při tisku (střídání ohřevu laserem a chladnutí), může vzniknout tak silné pnutí, které nedokážou podpory udržet, a díl se deformuje. Takto zdeformovaný díl se prohne nad rovinu prášku a během nanášení další vrstvy může zastavit pravítko (dávkoč prášku) a tedy i celý tisk [25] (viz Obrázek 16).



Obrázek 16 Díl (označen šipkou) nadzvednutý nad úroveň prášku [23]

6. Experimentální část

6.1 Popis experimentu

Pro experimentální část jsme zvolili vzorky ve tvaru destičky o rozměrech 50x50 mm. Máme 27 vzorků, které jsou rozdělené po třech skupinách po 9 vzorcích. Skupiny se liší tloušťkou desek a samotné vzorky 1-9 mají rozdílné parametry pro tisk. Parametry tisku se liší ve výkonu laseru a rychlosti tisku laseru. Tento experiment by nám měl ukázat jaké jsou ideální podmínky pro tisk tenkostěnných profilů a kde jsou hranice tisku takových profilů. Celý experiment byl řízen pomocí DoE (Design of Experiment, návrh experimentu). Byl zvolen plný faktoriál, kde byly navoleny 2 faktory (výkon laseru a rychlost tisku) a každý faktor měl 3 úrovně (faktor 1: 100, 200, 300 a faktor 2: 400, 650, 800), viz tabulka 3.

Vzorky S=100 μm			
1	3	5	7
2	4	6	8
Vzorky S=200 μm			
1	3	5	7
2	4	6	8
Vzorky S=300 μm			
1	3	5	7
2	4	6	8
			9

Obrázek 17 Rozvržení vzorků při tisku

Tabulka 3 Parametry tisku

	Výkon [W]	Rychlost tisku [mm·s ⁻¹]
1	100	400
2	100	650
3	100	800
4	200	400
5	200	650
6	200	800
7	300	400
8	300	650
9	300	800

6.2 Výrobní zařízení

Pro výboru testovacích vzorků jsme zvolili tiskárnu britského výrobce Renishaw model AM400. Je vybaven nejnovějšími aktualizacemi systému, včetně většího filtru SafeChange™ (který umožňuje manipulaci s práškem pomocí rukavic a tím minimalizuje kontakt uživatele s materiálem a emisemi z výrobního procesu) vylepšeného softwaru pro optickou kontrolu, revidovaného systému proudění plynu a ochrany oken a nového optického systému 400 W.

Zařízení AM400 je vybaveno externí násypkou s uzávěry ventilu, která umožňuje přidávání materiálu během procesu tisku. Je možné vyjmout násypku za účelem čištění nebo vyměnit za sekundární násypku za výměnu materiálu pomocí univerzálního sila. To znamená, že na platformě AM400 lze relativně jednoduše zaměnit více typů materiálů. Nádoby na přepouštění prášku jsou mimo komoru a mají uzavírací ventily, takže nepoužité materiály mohou být prosety a znovu zavedeny do procesu pomocí násypky, když je systém v provozu.

Tiskárny Renishaw pomocí patentované metody vytvoří v pracovní komoře vakuum, do které je následně vpuštěn čistý argon, což zajišťuje čistotu pracovního prostředí tisku a malou spotřebu argonu pro naplnění prostoru a provoz tiskárny. [25]



Obrázek 18 Renishaw AM400 [25]

Tabulka 4 Parametry tiskárny – Renishaw 400 W [25]

Výkon laseru	400 W
Průměr laserového paprsku	70 μm
Rozsah tisku	250x250x300 mm
Tloušťka tisknuté vrstvy	20 μm až 100 μm
Rychlost tisku	až 2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rychlost posuvu	7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Materiály prášku	AlSi10Mg, CoCr, In625, In718, stainless steel 316L, Ti6Al4V

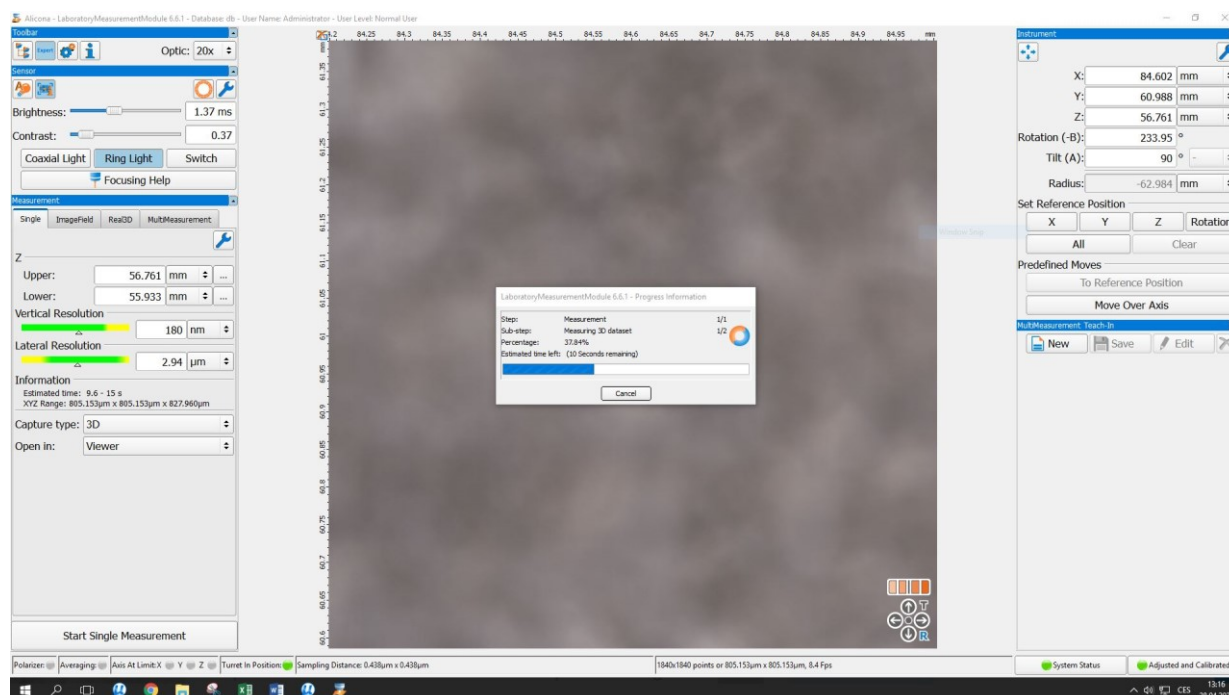
6.3 Materiál testovacích vzorků

Pro tisk vzorků jsme zvolili ocel 316L-0407, je to austenitická korozivzdorná ocel, která obsahuje železo legované chromem o hmotnostní frakci až 18 %, nikl až 14 % a molybden až 3 %, spolu s dalšími drobnými prvky. Díky nízkému obsahu uhlíku je 316L-0407 odolný vůči senzibilizaci (srážení karbidů na hranicích zrn) a má dobré svařovací vlastnosti. Má také nízké napětí na porušení a pevnost v tahu při vysokých teplotách. Materiál je tvrdý a houževnatý, vysoce odolný proti korozi, lze jej vysoce leštit.

Vhodné využití je pro formy na vstřikování plastů, chirurgické nástroje, přístroje a kuchyňské nádobí, díly pro námořní průmysl, šrouby a obecné strojírenství. [26]

6.4 Měření testovacích vzorků

Povrch testovacích vzorků jsme měřili pomocí zařízení Alicona G5. Jde o optický 3D měřicí systém, který pomocí jednoho senzoru měří rozměrovou přesnost a drsnost povrchu. Díky technologii Focus Variatiton je rozsah měřitelných povrchů téměř neomezený a pomocí sondy „Vertical Focus Probing“ je povrch měřen také laterálně. Zařízení lze nastavit na plně automatické měření ve výrobě. Výhody Alicony jsou relativně rychlý čas měření, vhodnost pro složité součásti díky 5osému měření (například nástroje), ale zároveň není vhodný na měření ploch s R_a menším než 10, a měření optických a průhledných ploch. [27]



Obrázek 19 Načítání měřeného povrchu v systému Alicona

Pro měření vzorků pomocí Alicony, jsme zvolili 20x násobné zvětšení.



Obrázek 20 Optické měřicí zařízení Alicona G5 [27]

Tloušťku vzorků jsme měřili pomocí digitálního mikrometrického měřidla značky Kinex s rozsahem měřidla 0-25 mm, s přesností 0,001 mm. Toto měřidlo jsme volili z důvodu snadného měření a rychlého odečtení měřené hodnoty.

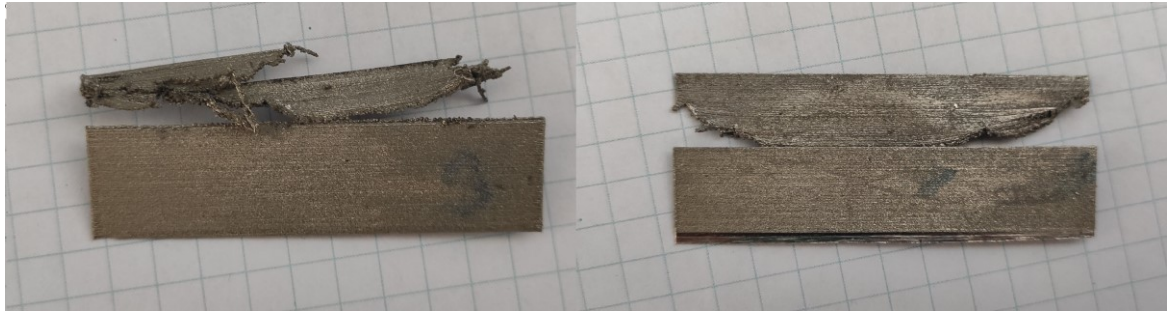


Obrázek 21 Posuvné měřitko Kinex

Výšku a šířku vzorku jsme měřili pomocí kalibrovaného digitálního měřidla.

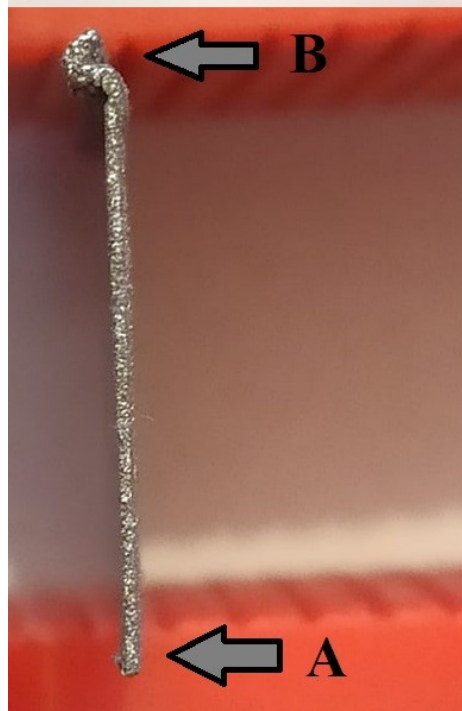
6.5 Průběh tisku

Průběh tisku byl nejprve bezproblémový, ale posléze se při tisku začali vzorky při určité výšce bortit a další vrstvy se již nespojovali s předchozími. Žádná ze tří skupin se nedotiskla do požadované výšky 50 mm. Tisk musel být postupně dle tloušťky materiálu potlačen, aby experiment mohl pokračovat. Vzorky $S = 100 \mu\text{m}$ se vytiskly do výšky 13,38 mm (267 vrstev), vzorky $S = 200 \mu\text{m}$ do výšky 18,31 mm (366 vrstev) a vzorky $S = 300 \mu\text{m}$ do výšky 23,36 mm (467 vrstev).

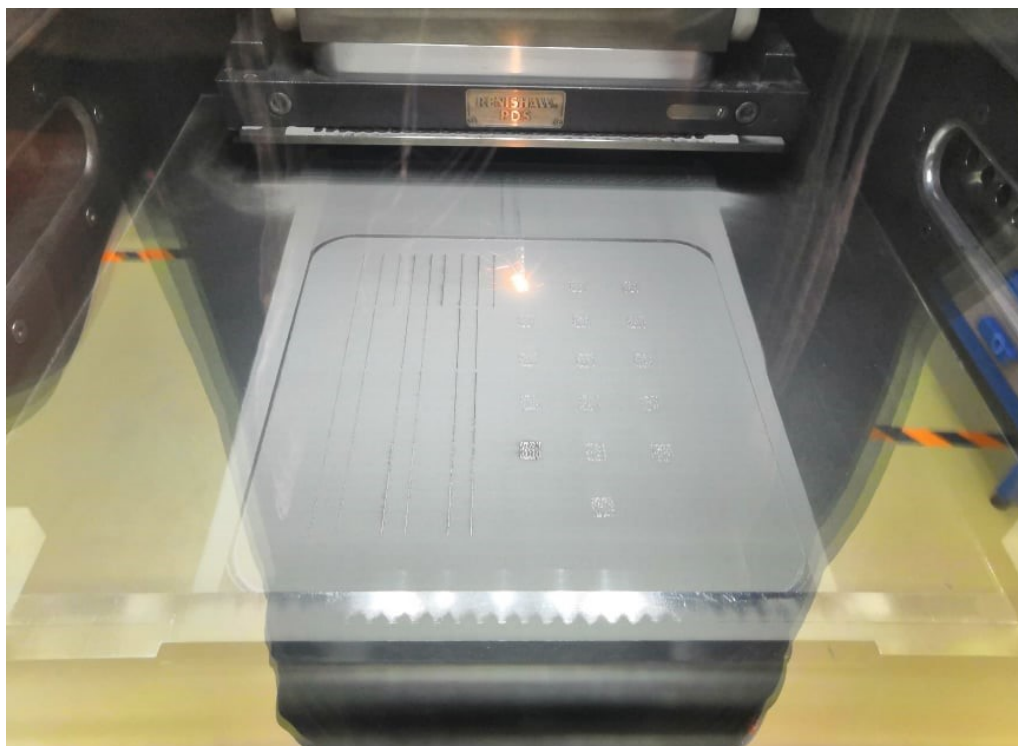


Obrázek 22 Nedotisknuté vzorky

Na obrázku č. 23 je vidět začátek tisku bod A až po bod B, kde byla tloušťka vzorku konstantní. V bodě B se další nanášené vrstvy začali bortit, nejspíše z důvodu nenavázání na přechozí vrstvu, což způsobilo, že se již nedokázaly po celé délce spéct.

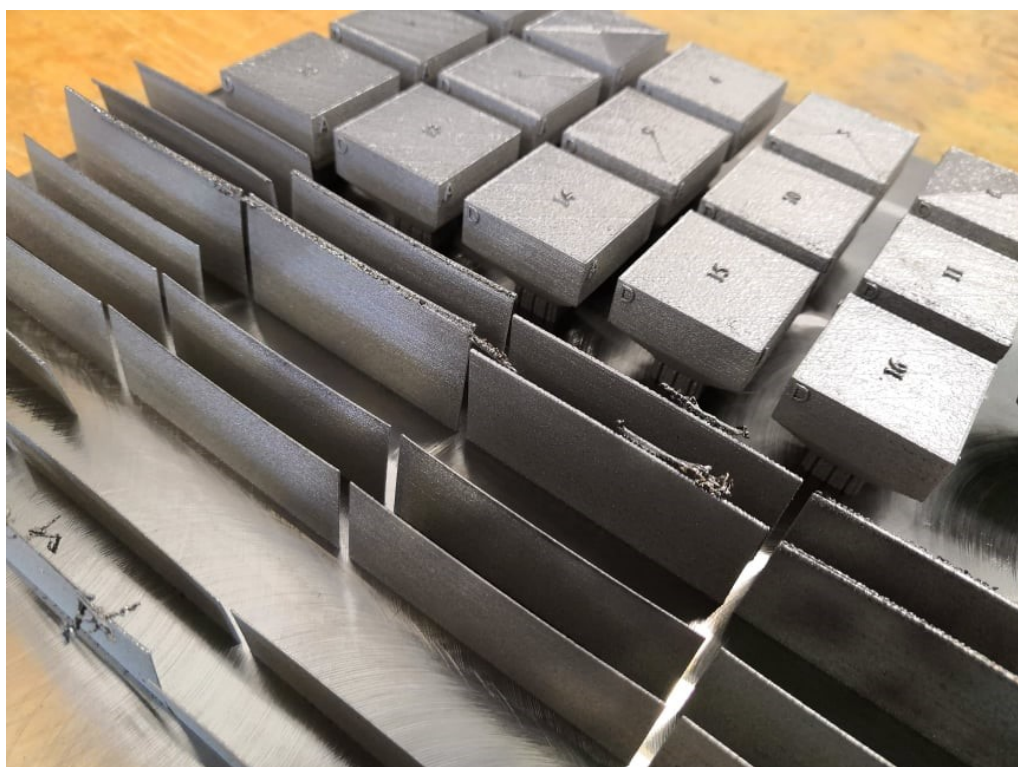


Obrázek 23 Nedotisknutý vzorek se zborcenou hranou



Obrázek 25 Průběh tisku na zařízení Renishaw AM400

Po dokončení tisku se všechny vzorky pomocí pásové pily odřezaly od základní desky.



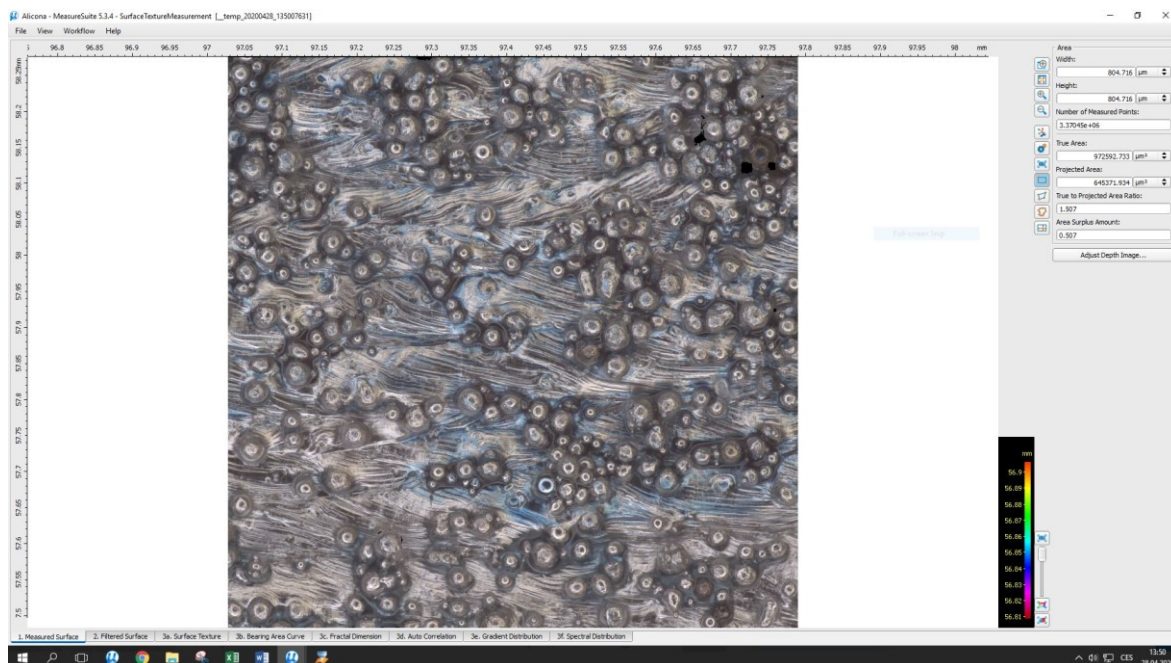
Obrázek 24 Vytisknuté vzorky na základové desce

6.6 Měření vzorků

Po vytisknutí jsme na všech 27 kusech vzorků, měřili jejich výšku, šířku, tloušťku a parametry drsnosti Ra, Rz, Sa a Sz (viz Obrázek č.27) Každá hodnota na všech vzorcích, byla měřena na třech náhodných bodech. Hodnoty se statisticky vyhodnotily a byl spočítán konečný výsledek.



Obrázek 26 3D model vygenerovaný pomocí měření na Alicona G5

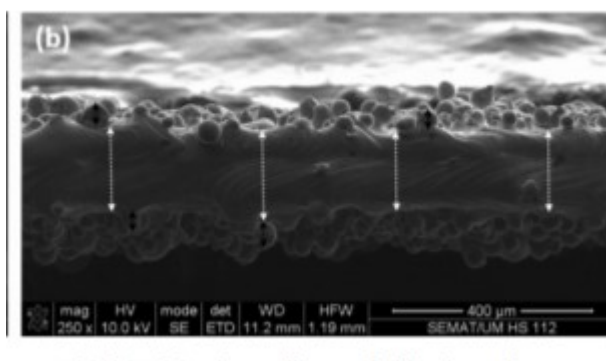


Obrázek 27 Měřený vzorek na Alicone G5 při 20násobném většení

6.6.1 Měření vnějších rozměrů

Vnější rozměry vzorků, jsme měřili pro zjištění vlivu podmínek tisku na tloušťku vzorku a jejich délky. Tloušťku jsme měřili pomocí mikrometrického měřidla a délku pomocí posuvného měřítka. Původní záměr byl měřit tloušťku vzorku pomocí zařízení Alicona G5, ale nakonec jsme se rozhodli měřit mikrometrem, z důvodu že jsme nebyli schopni ustavit vzorky tak aby byly kolmo k základně, aby bylo měření přesné, protože vzorky jsou díky své tloušťce mírně zvlněné.

Naměřená tloušťka pomocí mikrometru je zkreslená, díky připečeným kuličkám na ploše, o které se při měření opírají dotečky mikrometru a neměří tak skutečný plný průřez vzorku, viz Obrázek č. 28 [5], kde lze vidět Balling efekt (viz kapitola 1.12) a zkreslení skutečné tloušťky vzorku. U menších tlouštěk 100 μm mohou kuličky zkreslovat tloušťku vzorku až o 300%.



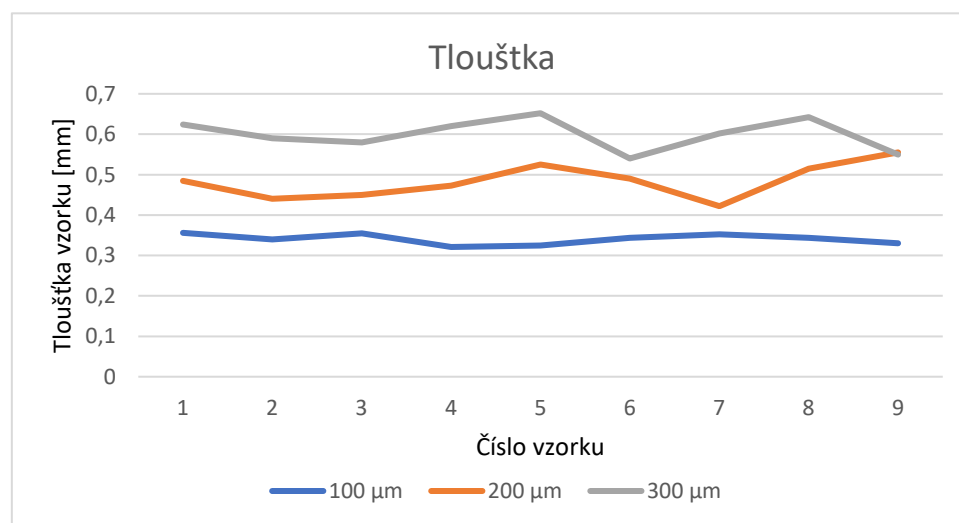
Obrázek 28 Detailní pohled na povrch tisku s kuličkami [5]



Obrázek 29 Měření tloušťky vzorku pomocí mikrometru

Tabulka 5 Naměřené hodnoty rozměrů vzorku

	100 μm		200 μm		300 μm		Parametry tisku	
Č.v.	S [mm]	L [mm]	S [mm]	L [mm]	S [mm]	L [mm]	Výkon [W]	Rychlost tisku [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
1	0,356	50,06	0,485	50,02	0,624	50,05	100	400
2	0,34	50,05	0,44	50	0,59	50,6	100	650
3	0,355	50,1	0,45	50,3	0,58	50,1	100	800
4	0,321	50,02	0,473	50,05	0,62	50,12	200	400
5	0,325	50,03	0,525	50	0,652	50,05	200	650
6	0,344	50,18	0,49	50,15	0,54	49,9	200	800
7	0,352	50,06	0,422	50,03	0,602	50,16	300	400
8	0,344	50,02	0,515	50,12	0,642	50,16	300	650
9	0,33	50,03	0,555	50,13	0,55	50,8	300	800



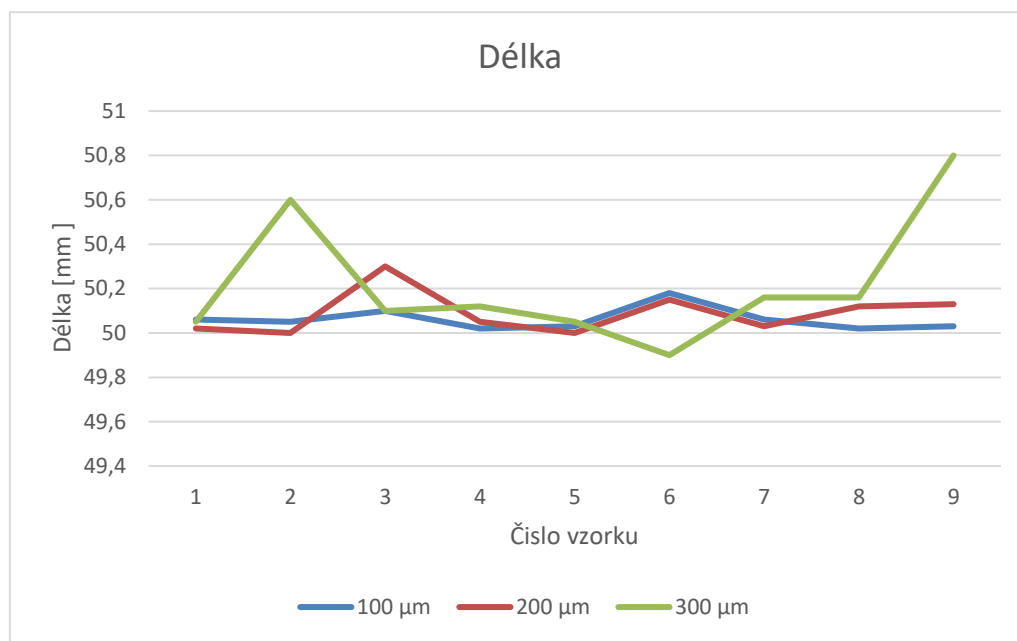
Graf 3 Tloušťky vzorku

Co se týče tloušťky vzorku, vyhodnocujeme naměřené hodnoty dle toho, jak moc se blíží rozměru, který mají mít.

Pro první sadu 100 μm platí, že nejlepší parametry jsou výkon laseru 200 W a rychlost skenování 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, za to nejhorší výkon laseru 100 W a rychlost skenování 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

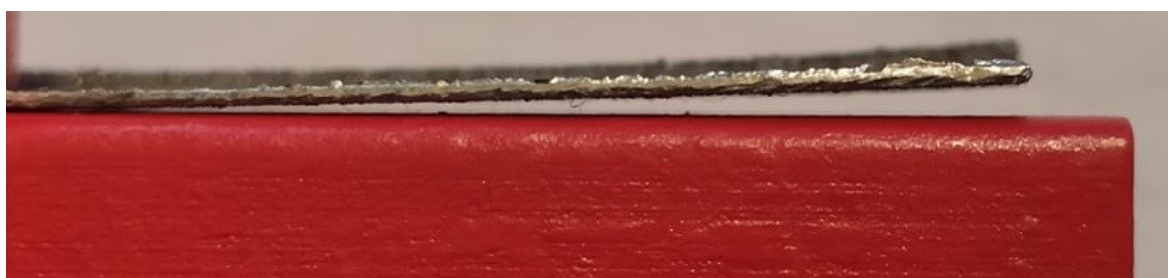
U druhé sady 200 μm platí, že nejlepší parametry jsou výkon laseru 300 W a rychlost skenování 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, za to nejhorší výkon laseru 200 W a rychlost skenování 650 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

U poslední třetí sady 300 μm platí, že nejlepší parametry jsou výkon laseru 200 W a rychlost skenování 800 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, za to nejhorší výkon laseru 200 W a rychlost skenování 650 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.



Graf 4 Délky vzorku

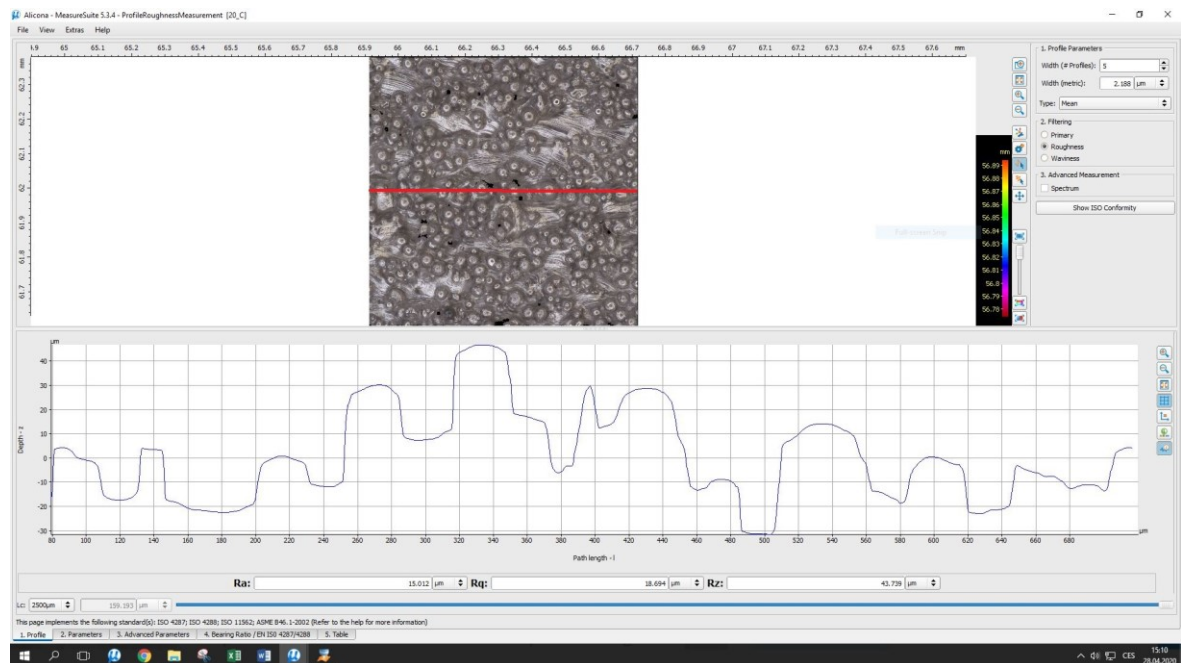
Délka byla měřena pomocí kalibrovaného posuvného měřítka. Měření bylo orientační a nepřesné z důvodu deformace vzorku vlivem vnitřního napětí. (měřený vzorek je při měření kratší).



Obrázek 30 Ukázka prohnutí vzorku, vlivem vnitřního napětí

6.6.2 Měření drsnosti povrchu – Ra, Rz

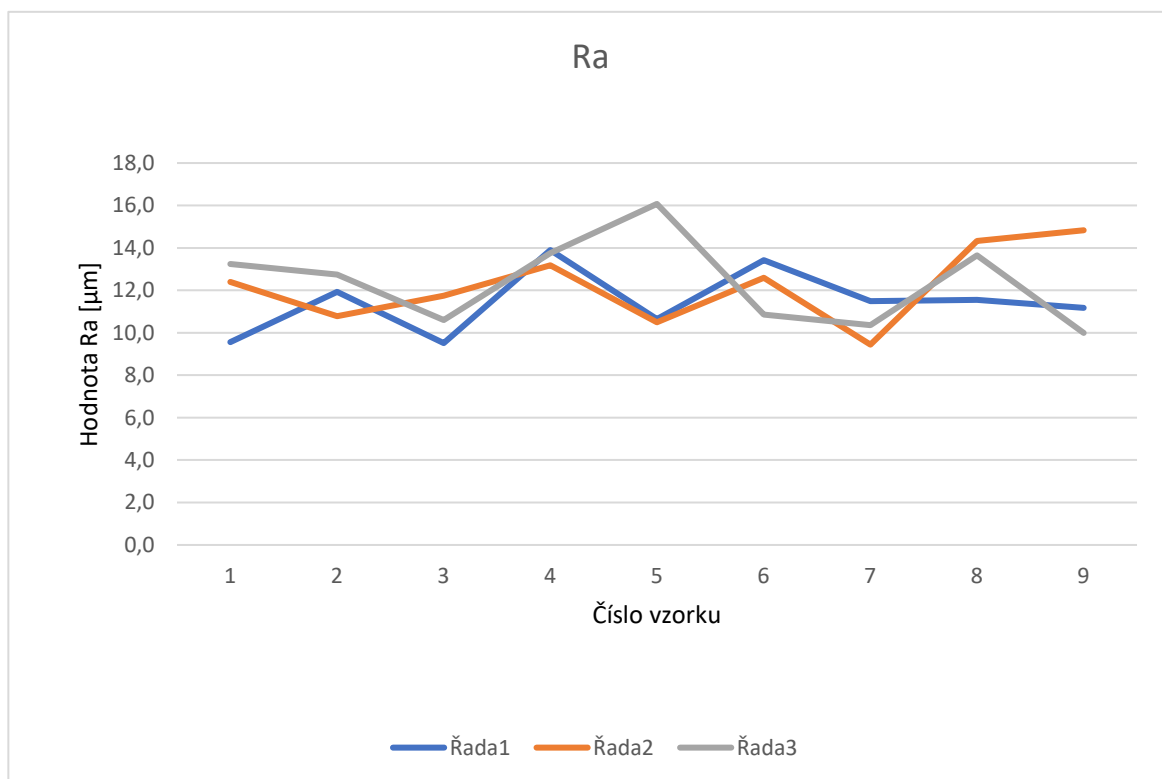
Drsnost profilu Ra a Rz, jsme měřili pomocí zařízení Alicona G5. Měření drsnosti profilu vzorku touto metodou zkresluje měřený profil vzorku. Dle červené přímky (Obrázek č. 31), kterou zařízení zvolí, jako měřený profil se určí hodnoty Ra a Rz. S tím, jak se na vzorcích objevují připečené kuličky, které mají mezi sebou rozestupy, může mít měření na jednom vzorku výrazně rozdílné hodnoty. Záleží, jde-li přímka mezi kuličkami nebo přes kuličky, tím pádem je měření méně přesné.



Obrázek 31 Měření Ra a Rz v programu Alicona Messuresuit

Tabulka 6 Naměřené hodnoty Ra vzorku

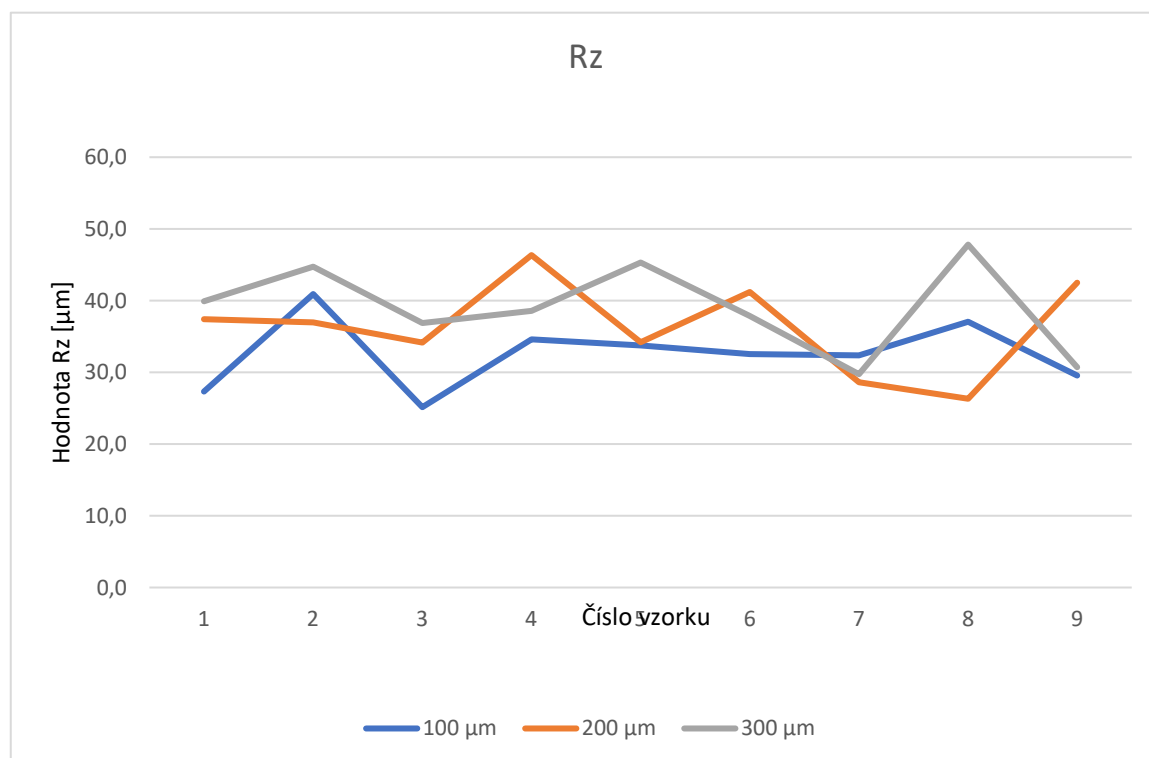
Ra	100 μm		200 μm		300 μm	
	Ra [μm]	σ [μm]	Ra [μm]	σ [μm]	Ra [μm]	σ [μm]
1	9,6	$\pm 1,04$	12,4	$\pm 0,58$	13,2	$\pm 1,29$
2	11,932	$\pm 1,18$	10,787	$\pm 1,14$	12,735	$\pm 1,05$
3	9,512	$\pm 1,09$	11,749	$\pm 0,55$	10,604	$\pm 0,88$
4	13,897	$\pm 1,06$	13,187	$\pm 0,85$	13,761	$\pm 0,43$
5	10,642	$\pm 0,19$	10,492	$\pm 0,53$	16,073	$\pm 0,33$
6	13,4	$\pm 1,64$	12,594	$\pm 0,98$	10,863	$\pm 0,34$
7	11,490	$\pm 1,02$	9,441	$\pm 0,77$	10,363	$\pm 0,40$
8	11,549	$\pm 0,59$	14,331	$\pm 0,48$	13,655	$\pm 1,61$
9	11,174	$\pm 0,39$	14,831	$\pm 0,34$	9,9926	$\pm 0,97$



Graf 5 Výsledné hodnoty Ra vzorku

Tabulka 7 Výsledné hodnoty Rz vzorku

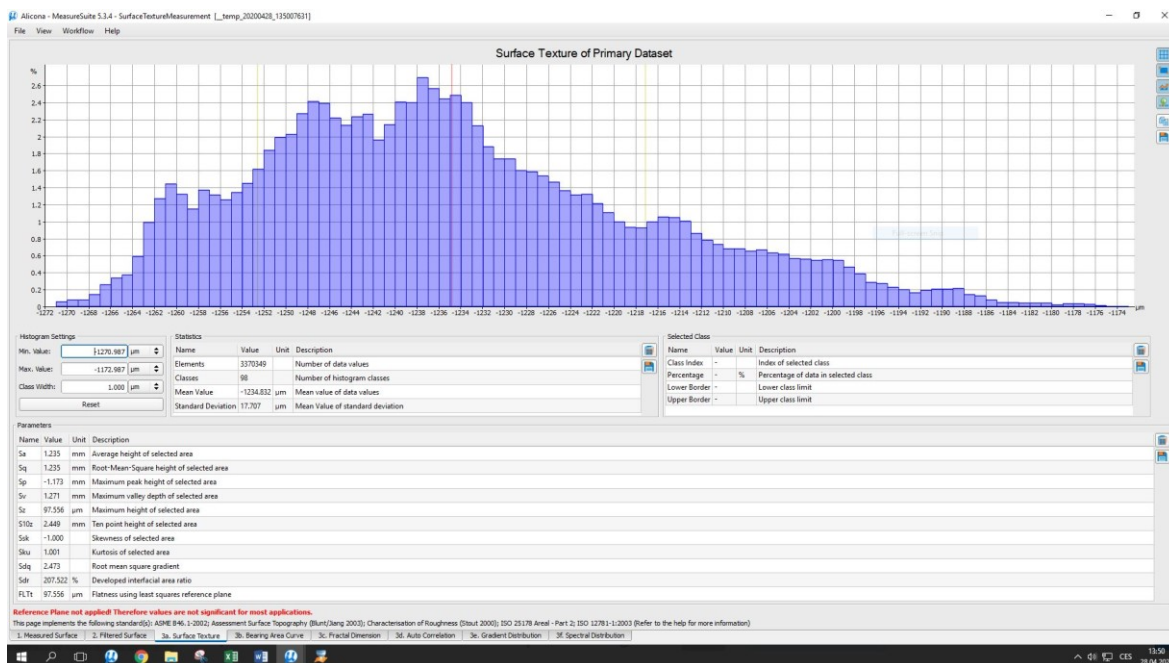
Rz	100 μm		200 μm		300 μm	
	Rz [μm]	σ [μm]	Rz [μm]	σ [μm]	Rz [μm]	σ [μm]
1	27,3	$\pm 4,19$	37,4	$\pm 9,2$	39,9	$\pm 3,60$
2	40,919	$\pm 5,23$	36,968	$\pm 3,50$	44,738	$\pm 8,24$
3	25,145	$\pm 1,90$	34,142	$\pm 3,42$	36,886	$\pm 2,47$
4	34,618	$\pm 3,85$	46,35	$\pm 8,59$	38,594	$\pm 2,44$
5	33,758	$\pm 0,88$	34,200	$\pm 0,30$	45,307	$\pm 5,41$
6	32,544	$\pm 8,42$	41,203	$\pm 3,14$	37,847	$\pm 1,03$
7	32,374	$\pm 2,85$	28,633	$\pm 1,50$	29,745	$\pm 2,08$
8	37,048	$\pm 3,23$	26,321	$\pm 9,87$	47,816	$\pm 2,96$
9	29,55	$\pm 2,32$	42,512	$\pm 2,19$	30,739	$\pm 2,32$



Graf 7 Výsledné hodnoty Rz vzorku

6.6.3 Měření poměrné plošné drsnosti Sa a Sz

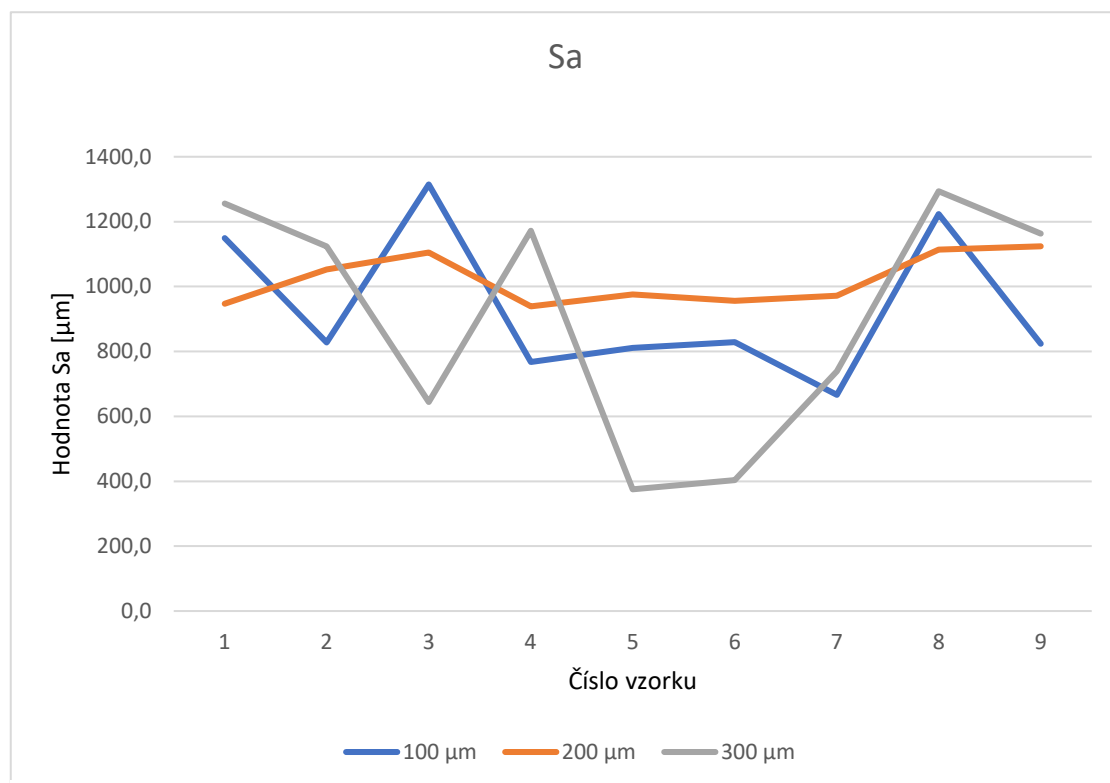
Drsnost poměrné plochy jsme měřili pomocí Alicony G5. Měření plošné drsnosti je vhodnější a lépe vypovídající na měření povrchu pro 3D tisk než Ra a Rz. Díky tomu že se měří průměrná drsnost celé plochy, a ne pouze průřezu



Obrázek 33 Měření Sa a Sz pomocí zařízení Alicona G5

Tabulka 8 Výsledné hodnoty Sa

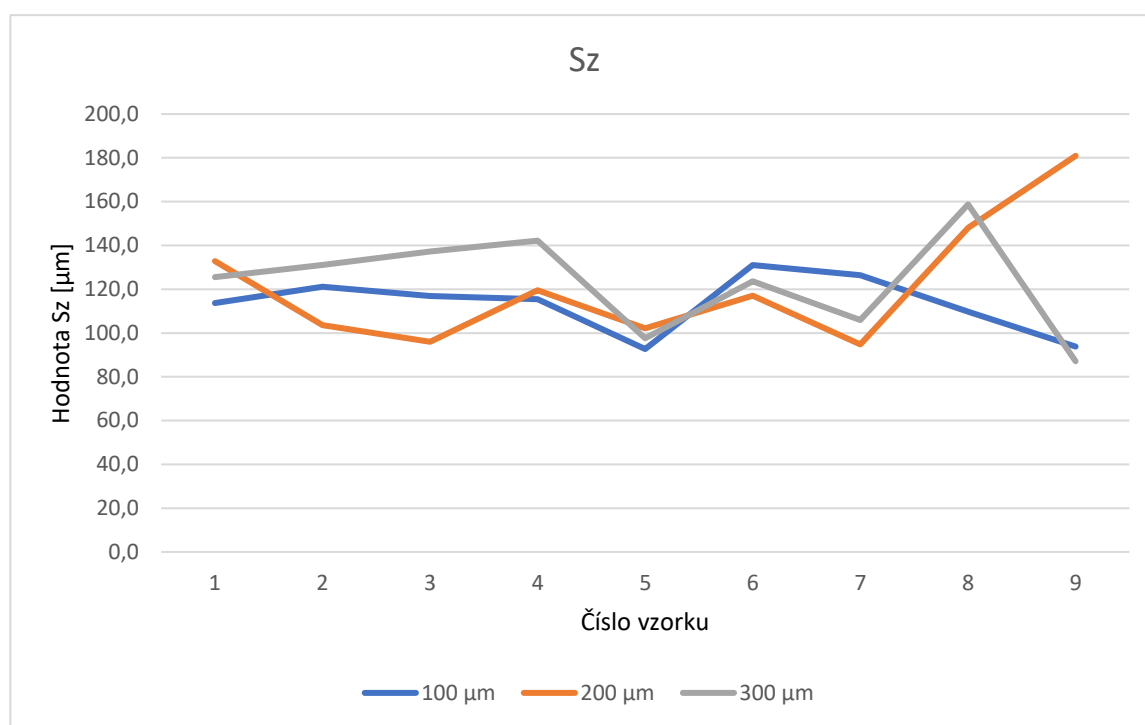
Sa	100 µm		200 µm		300 µm	
	Sa [µm]	σ [µm]	Sa [µm]	σ [µm]	Sa [µm]	σ [µm]
1	1148,9	± 62,75	947,0	± 133,58	1256,3	± 10,08
2	827,685	± 87,90	1052,707	± 1351,00	1123,67	± 9,31
3	1314,67	± 37,19	1104,44	± 144,70	644,355	± 10,80
4	767,243	± 17,29	938,967	± 132,30	1172,39	± 96,85
5	811,069	± 21,64	975,793	± 118,20	375,178	± 9,78
6	828,681	± 46,50	956,045	± 184,51	403,317	± 88,50
7	666,244	± 21,01	972,218	± 148,52	738,5	± 68,92
8	1223,21	± 112,30	1114,084	± 69,67	1293,67	± 27,10
9	823,768	± 19,90	1124	± 11,50	1163,56	± 83,37



Graf 9 Výsledné hodnoty Sa

Tabulka 9 Výsledné hodnoty Sz

Sz	100 μm		200 μm		300 μm	
	Sz [μm]	σ [μm]	Sz [μm]	σ [μm]	Sz [μm]	σ [μm]
1	113,7	± 4,39	132,9	± 6,85	125,5	± 2,61
2	121,117	± 1,75	103,625	± 2,58	131,039	± 19,50
3	116,945	± 13,01	96,004	± 6,08	137,233	± 8,97
4	115,388	± 8,68	119,538	± 17,61	142,128	± 19,56
5	92,674	± 4,62	102,073	± 4,04	97,582	± 35,94
6	131,035	± 13,15	117,112	± 8,89	123,645	± 13,75
7	126,349	± 3,59	94,794	± 7,31	105,92	± 3,54
8	109,712	± 6,64	148,015	± 3,84	158,737	± 4,70
9	93,8613	± 4,46	180,917	± 14,27	87,103	± 35,02



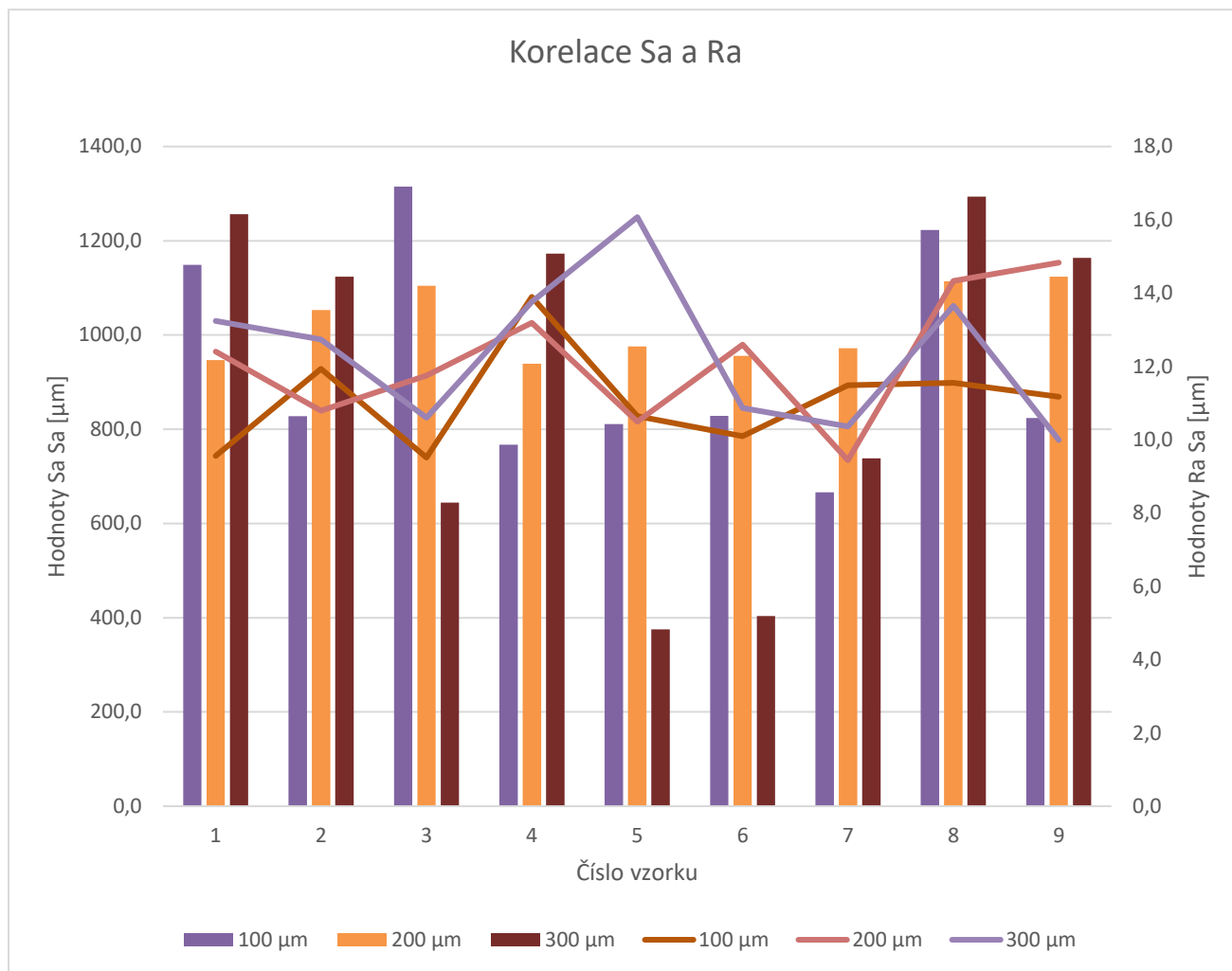
Graf 10 Výsledné hodnoty Sz

Co se týče drsnosti z první sady 100 μm platí, že nejlepší podmínky pro tisk je-li výkon laseru 300 W s rychlost skenování $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, a nejhorší je-li výkon laseru 100 W a rychlost skenování $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

U druhé sady 200 μm, jsou nejlepší podmínky pro tisk 200 W výkon laseru a rychlost skenování $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Nejhorší podmínky 300 W výkon laseru a rychlost skenování u $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Třetí testovací sada 300 μm, měla nejlepší podmínky pro tisk při výkonu laseru 200 W a skenovací rychlosti $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, a nejhorší při výkonu laseru 300 W a rychlosti skenování $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Obecně platí že čím vyšší skenovací rychlost tím horší povrch, ale zároveň velmi záleží na výkonu laseru. U testovacích vzorku se ideální výkony liší dle tloušťky vzorku. Tím pádem je důležité zjistit vždy ideální podmínky tisku pro danou tloušťku materiálu. Výsledné hodnoty Ra a Sa spolu nekorespondují, (viz Graf č. 8) a to již ze zmiňovaného důvodu nepřesnosti měření Ra, kdy na stejném, vzorku můžeme naměřit velmi rozdílné hodnoty, které zkresluji výsledek. Nepřesnost měření spočívá v měřeném profilu, procházeli měřený profil přes kuličky nebo spíš mezi nimi. Rozestupy mezi kuličkami jsou znatelné, takže se snadno při měření můžeme měřit relativně dobrý povrch.



Graf 11 Kombinovaný graf - porovnání hodnot Sa a Ra

6.7 Objemová hustota vyzářené energie E_v

Pro zhodnocení, jak moc energetický náročné jsou dané podmínky tisku, si spočteme objemovou hustotu vyzářené energie (6.1):

$$E_v = \frac{10^6}{v \cdot h_d \cdot t} \quad (J \cdot mm^{-3}) \quad (6.1)$$

Kde: h_d – šrafovací vzdálenost [μm]

t – tloušťka vrstvy [μm]

P – výkon laseru [W]

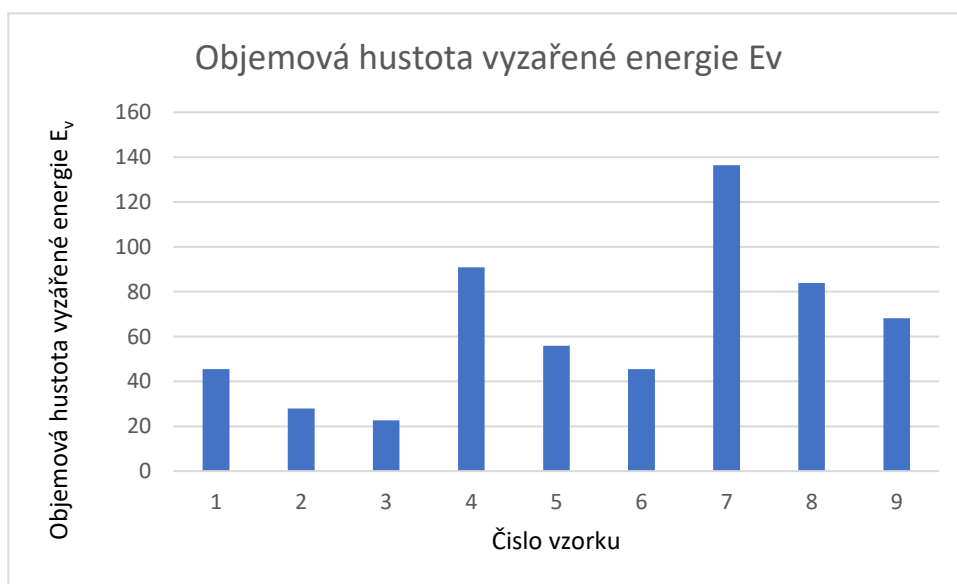
v – rychlost skenování [$mm \cdot s^{-1}$]

Tabulka 10 Výsledné hodnoty Objemové hustoty vyzářené energie

P.Č.	Výkon [W]	Rychlost tisku [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	E_v [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$]
1	100	400	45,45
2	100	650	27,97
3	100	800	22,72
4	200	400	90,9
5	200	650	55,94
6	200	800	45,45
7	300	400	136,36
8	300	650	83,91
9	300	800	68,18

Dle výpočtu objemové hustoty vyzářené energie (výsledky viz Tabulka 10, Graf 10), se jako energeticky nejnáročnější podmínky jeví varianta výkon laseru 300 W při rychlost skenování $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, a nejméně náročné je-li výkon laseru 100 W a rychlost skenování $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Výsledky nejnáročnější a nejméně energeticky náročné varianty jsou logické, s ohledem na to že náročná varianta vnáší největší energii při nejpomalejším skenování a u nenáročné varianty je to přesně naopak.



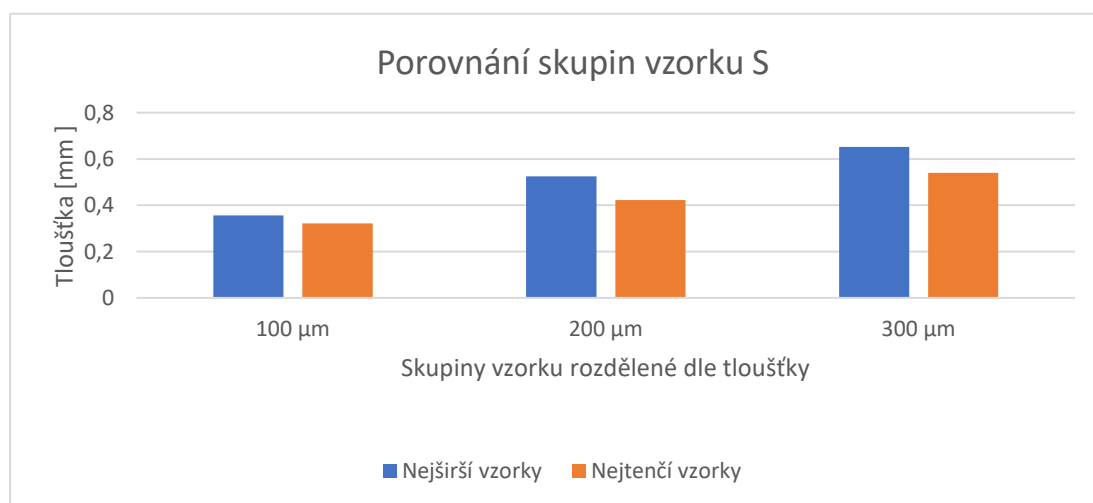
Graf 12 Výsledky Objemové hustoty vyzářené energie pro všechny parametry

7. Vyhodnocení – diskuze

Na základě provedeného experimentu nelze jednoznačně říci, jaké parametry tisku jsou obecně pro tisk tenkostěnných profilů nejlepší. Nejstěžejnější je vhodný poměr výkonu laseru a skenovací rychlosti, ale také tloušťka stěny profilu, případně její tvaru. Žádný z testovacích vzorků se nedotiskl do požadované výšky 50mm. Vzorky $S = 100 \mu\text{m}$ se vytiskly do výšky 13,38 mm (267 vrstev), vzorky $S = 200 \mu\text{m}$ do výšky 18,31 mm (366 vrstev) a vzorky $S = 300 \mu\text{m}$ do výšky 23,36 mm (467 vrstev). Z toho vyplývá, že tisk tenkostěnných profilů (o tloušťce stěny 100 μm , 200 μm , 300 μm) by byl limitován výškou součástí. Pro tisk součástí s větší výškou než je výše uvedená by bylo zapotřebí provést další experiment s jinými parametry tisku a ověřit zdali je to vůbec možné. Nedotištění vzorků je pravděpodobně způsobeno nenavázáním předchozí vrstvy, kdy vlivem vnitřního napětí dojde k distorzi a k nepatrnému posunutí vrstvy.

Nejlepší a nejhorší podmínky pro tisk vzhledem k přírůstku na tloušťce vzorku, který vzniká díky jevu, který se nazývá „Balling“ jsou:

- Pro první sadu 100 μm platí, že nejlepší parametry jsou výkon laseru 200 W a rychlost skenování 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, za to nejhorší výkon laseru 100 W a rychlost skenování 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
- U druhé sady 200 μm platí, že nejlepší parametry jsou výkon laseru 300 W a rychlost skenování 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, za to nejhorší výkon laseru 200 W a rychlost skenování 650 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
- U poslední třetí sady 300 μm platí, že nejlepší parametry jsou výkon laseru 200 W a rychlost skenování 800 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, za to nejhorší výkon laseru 200 W a rychlost skenování 650 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. U takto tenkých dílů je přírůstek značný, u 100 μm až 300 %, ale reálná

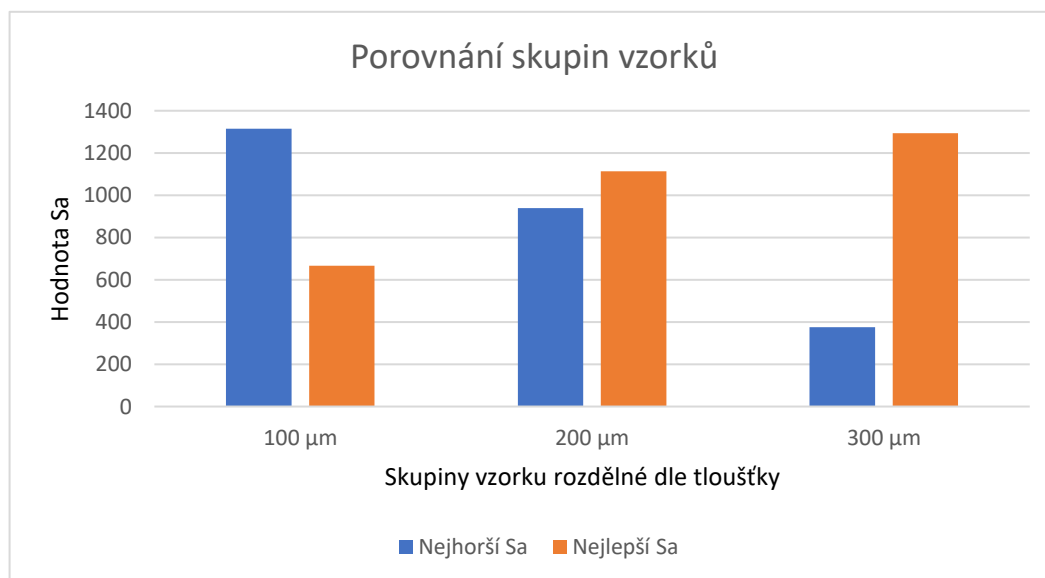


Graf 14 Porovnání nejlepších a nejhorších vzorku - parametru SaGraf 15 Porovnání nejlepších a nejhorších vzorku - parametru tloušťky

tloušťka vzorku je nižší. Porovnání rozdílu nejlepších a nejhorších vzorku dle tloušťky znázorňuje Graf č. 11.

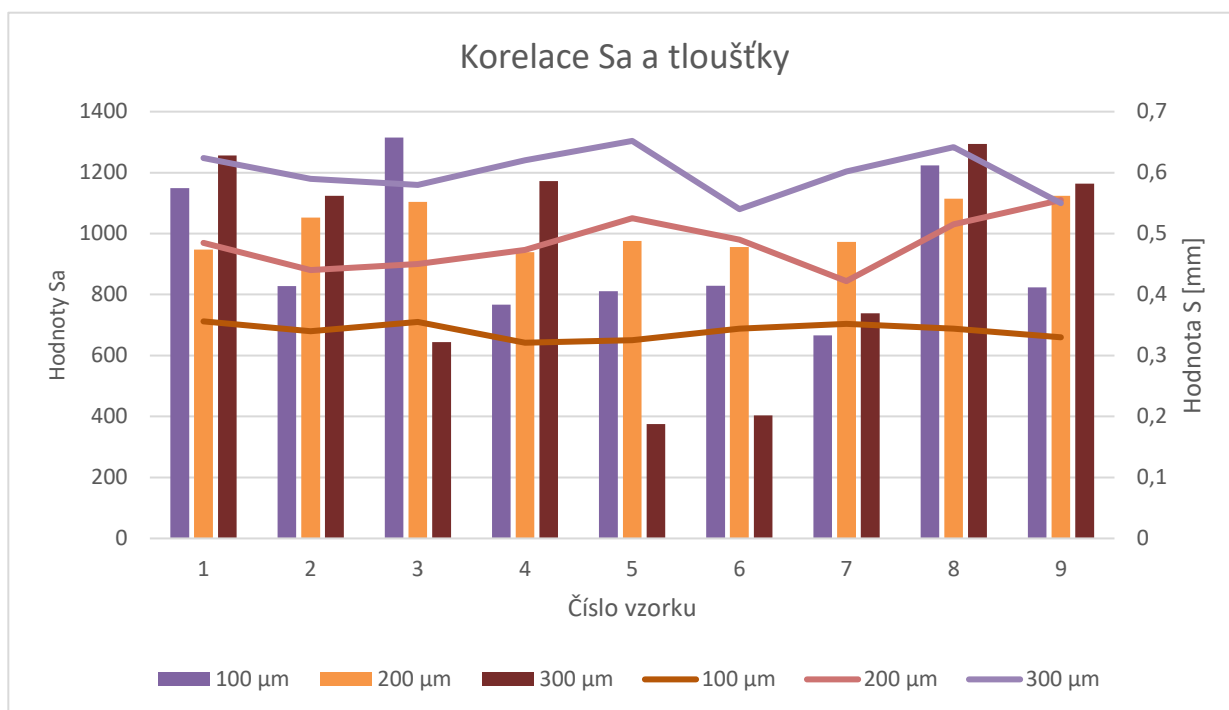
Naměřené hodnoty drsnosti nám ukázaly, že hodnoty R_a , R_z nekoreluji s S_a , S_z , a to z důvodu nepřesnosti měření R_a , R_z . Proto pro tento experiment považujeme za směrodatné hlavně hodnoty S_a , S_z . Nejlepší a nejhorší parametry dle drsnosti povrchu jsou tyto:

- Co se týče drsnosti z první sady $100\ \mu\text{m}$ platí, že nejlepší podmínky pro tisk je-li výkon laseru $300\ \text{W}$ s rychlostí skenování $400\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, a nejhorší je-li výkon laseru $100\ \text{W}$ a rychlost skenování $800\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
- U druhé sady $200\ \mu\text{m}$, jsou nejlepší podmínky pro tisk $200\ \text{W}$ výkon laseru a rychlost skenování $400\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Nejhorší podmínky $300\ \text{W}$ výkon laseru a rychlost skenování u $650\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Třetí testovací sada $300\ \mu\text{m}$, měla nejlepší podmínky pro tisk při výkonu laseru $200\ \text{W}$ a skenovací rychlosti $650\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, a nejhorší při výkonu laseru $300\ \text{W}$ a rychlosti skenování $650\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Porovnání rozdílu nejlepších a nejhorších vzorku dle drsnosti znázorňuje Graf č. 12.



Graf 16 Porovnání nejlepších a nejhorších vzorku - parametru S_a

Graf 17 Porovnání korelace hodnot S_a s tloušťkou vzorku
Graf 18 Porovnání nejlepších a nejhorších vzorku - parametru S_a



Graf 19 Porovnání korelace hodnot Sa s tloušťkou vzorku

Graf 20 Porovnání korelace hodnot Sa s tloušťkou vzorku

Srovnáním nejlepších a nejhorších vzorků vzhledem k přesnosti tloušťky a nejlepších a nejhorších vzorků vzhledem k drsnosti Sa, nám vyplynulo, že tyto hodnoty spolu nekorelují. Neoptimálnější parametry tisku pro přesnost tloušťky nejsou optimální pro nejlepší hodnotu Sa, z toho vyplývá, že při tisku tenkostěnných profilů si musíme určit prioritu, zdali preferujeme nejlepší přesnost tisku nebo výsledný povrch.

8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ověřit možnosti a hranice tisku tenkostěnných profilů pomocí aditivní technologie SLM. V teoretické části byly seskupeny informace nutné k pochopení problematiky aditivních technologií, co se týče možností tisku, důležitých parametrů a potřebné informace k provedení experimentu.

Pro experimentální část jsme zvolili vzorky ve tvaru destičky o rozměrech 50x50 mm. Máme 27 vzorků, které jsou rozdělené po třech skupinách po 9 vzorcích. Skupiny se liší tloušťkou desek (100 μm , 200 μm a 300 μm) a samotné vzorky 1-9 mají rozdílné parametry pro tisk. Celý experiment byl řízen pomocí DoE (Design of Experiment, návrh experimentu). Byl zvolen plný faktoriál, kde byly navoleny 2 faktory (výkon laseru a rychlost skenování tisku) a každý faktor měl 3 úrovně (faktor 1: 100, 200, 300 a faktor 2: 400, 650, 800).

Tisk vzorků musel být postupně dle tloušťky materiálu potlačen, aby experiment mohl pokračovat, z důvodu zborcení vzorku. Žádná skupina vzorku se nedotiskla na požadovanou výšku 50 mm. Vzorky $S = 100 \mu\text{m}$ se vytiskly do výšky 13,38 mm (267 vrstev), vzorky $S = 200 \mu\text{m}$ do výšky 18,31 mm (366 vrstev) a vzorky $S = 300 \mu\text{m}$ do výšky 23,36 mm (467 vrstev). Nedotištění vzorků je pravděpodobně způsobeno nenavázáním předchozí vrstvy, kdy vlivem vnitřního napětí dojde k distorzi a k nepatrnému posunutí vrstvy. Výsledky měření drsnosti vzorků ukázaly, že neexistují univerzální parametry tisku pro tenkostěnné profily v rozsahu tlouštěk $S = 100\text{--}300 \mu\text{m}$. Stejně parametry tisku u různých skupin vytvořili rozdílné hodnoty drsnosti. Porovnáním výsledků bylo zjištěno, že výsledná drsnost povrchu přímo nekoreluje s přesností tloušťky vzorku. Přírůstek tloušťky je způsobem efektem nazývaným „balling“.

Výsledky této diplomové práce považuji za relevantní a použitelné pro tisk tenkostěnných profilů z korozivzdorné oceli 316L na zařízení Renishaw AM400.

Při tisku jiných tlouštěk tenkostěnných profilů, doporučuji experimentálně ověřit tyto hodnoty, abychom mohli určit parametry tisku pro získání námi požadovaného výsledku. Je potřeba si určit, zda požadujeme nejlepší povrch nebo nejlepší rozměrovou přesnost. Jako další experiment bych navrhoval vyzkoušet tisk vzorku o tloušťce 400 μm a 500 μm , případně tisk kruhových profilů (trubičky $\varnothing 4\text{--}10 \text{ mm}$) místo plechu, a hledal vhodné parametry pro tisk.

9. Použitá literatura

- [1] ILČÍK, J. *Geometrická přesnost výroby kovových dílů aditivní technologií Selective Laser Melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D..
- [2] DVOŘÁK, Jan. *Technologické možnosti aditivních technologií* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní.
- [3] Protolab.cz. *PROTOLAB* [online]. Ostrava, 2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-kovovych-slitin/>
- [4] HOFMANN, Manfred. 3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials. *ACS Macro Letters* [online]. 2014, **3**(4), 382-386 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1021/mz4006556. ISSN 2161-1653. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/mz4006556>
- [5] LIGON, Samuel Clark, Robert LISKA, Jürgen STAMPFL, Matthias GURR a Rolf MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews* [online]. 2017, **117**(15), 10212-10290 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. ISSN 0009-2665. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- [6] HORÁČEK, Libor, Vojtěch PRAŽMA a Pavel VYDRA. Aditivní technologie pro Průmysl 4.0. *MM Spektrum* [online]. 2018, **2018**(180445) [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-pro-prumysl-4-0.html>
- [7] SCHWAB, Klaus, 2017. *The Fourth Industrial Revolution*. Portfolio. ISBN 9780241300756.
- [8] Selective Deposition Lamination (SDL). 3D Printing Industry. [Online] [cit. 2020-05-14] <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>.
- [9] JANOVEC, Martin. *Užitné vlastnosti výrobků připravených pomocí technologie 3D tisku*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 138 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45097>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav fyziky a mater. inženýrství. Vedoucí práce Smolka, Petr.

- [10] *Www.trumpf.com* [online]. Praha: TRUMPF, 2020 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/
- [11] Selective Laser Melting. Register | Member Portal TWI Ltd [online]. 2017 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/capabilities/joiningtechnologies/additive-manufacturing/selective-laser-melting/>
- [12] Přehled technologií 3D tisku. *Www.dkmp.cz* [online]. Ostrava: Webdesign Amenit [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku>
- [13] HAJNYŠ, Jiří. Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitečných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 122 stran, 64 obrázků, 29 tabulek. Školitel: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
- [14] JHABVALA, Jamasp, Eric BOILLAT, Thibaud ANTIGNAC a Rémy GLARDON. On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2010, **5**(2), 99-109 [cit. 2020-05-03]. DOI: 10.1080/17452751003688368. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452751003688368>
- [15] RENISHAW, Magics training: Material profile editing. RENISHAW: apply innovation. United Kingdom: Renishaw, 2016. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com>
- [16] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2**(4) [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1063/1.4935926. ISSN 1931-9401. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4935926>
- [17] YADROITSEV, I., Ph. BERTRAND a I. SMUROV. Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science* [online]. 2007, **253**(19), 8064-8069 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088. ISSN 01694332. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433207003534>
- [18] VITÁSEK, Ladislav. *MECHANICKÉ VLASTNOSTI AI SLITINY PŘIPRAVENÉ POMOCÍ PROCESU SLM* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/101330?zp_id=101330. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

[19] YADROITSEV, I. a I. SMUROV. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia* [online]. 2010, **5**, 551-560 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.083. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389210005092>

[20] KHAN, Mustaq. *Numerical Simulation of Meltpool Instability in the Selective Laser Melting (SLM) Process* [online]. 2014 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Nadeem_Sheikh5/publication/265794173_Numerical_Simulation_of_Meltpool_Instability_in_the_Selective_Laser_Melting_\(SLM\)_Process/links/541c09e20cf241a65a0bacfc.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nadeem_Sheikh5/publication/265794173_Numerical_Simulation_of_Meltpool_Instability_in_the_Selective_Laser_Melting_(SLM)_Process/links/541c09e20cf241a65a0bacfc.pdf). Publikace.

[21] PENG, T., CHAO CH. Influence of energy density on energy demand and porosity of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* [online]. 2018, 5(1), 55-62 [cit. 2020-04-17]. DOI: 10.1007/s40684-018-0006-9. ISSN 2288

[22] YANG, Huihui, Jingjing YANG, Wenpu HUANG, Zemin WANG a Xiaoyan ZENG. The printability, microstructure, crystallographic features and microhardness of selective laser melted Inconel 718 thin wall. *Materials & Design* [online]. 2018, **156**, 407-418 [cit. 2020-05-07]. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.07.007. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127518305379>

[23] YADROITSEV, I., Ph. BERTRAND a I. SMUROV. Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science* [online]. 2007, **253**(19), 8064-8069 [cit. 2020-05-08]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088. ISSN 01694332. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433207003534>

[24] ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby malých strojních kovových součástí 3D tiskem* [online]. Plzen, 2017 [cit. 2020-05-04]. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.

[25] Renishaw-am-400/. *Www.aniwaa.com* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/renishaw-am-400/>

- [26] Renishaw AM400. *Renishaw.com* [online]. 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ss-316l-0407-powder-for-additive-manufacturing--90802>
- [27] Alicona InfiniteFocus G5. *Alicona.com* [online]. 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>
- [28] MIRANDA, G., S. FARIA, F. BARTOLOMEU, E. PINTO, N. ALVES, N. PEIXINHO, M. GASIK a F.S. SILVA. A study on the production of thin-walled Ti6Al4V parts by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **39**, 346-355 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.036. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S152661251831870X>

Poděkování

Na závěr své diplomové práce, ale i magisterského studia bych chtěl poděkovat všem, kteří mě celou dobu během studia podporovali a stáli při mě, a to hlavně mým rodičům, prarodičům, rodině, milované snoubence, její rodině a nakonec i našemu 11 měsíčnímu synovi, který nám vnáší jen radost do života a zapůjčil mi červenou kostičku ke zhotovení obrázku č.30.

Ohledně diplomové práce bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Hajnyšovi PhD., za podporu během tvorby diplomové práce, pomoci při řešení problému a zodpovězení všech mých dotazů.